

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

**Теплофизические
свойства
технически важных
газов
при высоких
температурах
и давлениях**

СПРАВОЧНИК

Согласовано
с Государственной службой
стандартных
справочных данных



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1989

ББК 31.31

Т 34

УДК 533.1.092/.096 (035.5)

Рецензент В. А. Рабинович

Теплофизические свойства технически важных
Т 34 газов при высоких температурах и давлениях: Справочник/В. Н. Зубарев, А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов и др.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 232 с.: ил.
ISBN 5-283-00108-3

Даны табулированные значения теплофизических свойств 14 технических важных газов (неона, аргона, криптона, ксенона, азота, кислорода и др.) в области высоких температур и давлений (500—3000 К, 100—400 МПа).

Для инженеров и научных работников, проектирующих и исследующих энергетическое, теплообменное и энерготехнологическое оборудование.

Т $\frac{2203020000-027}{051(01)-89}$ 188-89

ББК 31.31

ISBN 5-283-00108-3

© Энергоатомиздат, 1989

В настоящее время нет подробных таблиц теплофизических свойств технически важных газов при высоких температурах и давлениях, построенных с учетом реальности газов, т. е. с учетом сил межмолекулярного взаимодействия. Однако в связи с непрерывным повышением используемых параметров во многих областях современной науки, техники и технологии, в частности в энергетике, геологии, химической технологии, газовой промышленности, потребность в таких таблицах существует и со временем возрастает.

Получение надежных справочных данных о теплофизических свойствах сжатых газов при высоких температурах связано со значительными трудностями, обусловленными прежде всего тем, что существующие экспериментальные данные как о равновесных свойствах, так и о свойствах переноса плотных газов получены в ограниченном температурном интервале с верхней границей, не превышающей в основном 800—1000 К. Это обстоятельство не позволяет для расчета таблиц при высоких температурах использовать традиционный метод, заключающийся в построении эмпирических уравнений при обработке экспериментальных данных и расчете по ним табличных значений, так как эти уравнения практически непригодны для получения данных за пределами экспериментально исследованной области. Поэтому отсутствуют таблицы теплофизических свойств газов при высоких температурах, которые отражали бы свойства реальных газов (с учетом сил межмолекулярного взаимодействия), а имеющиеся в справочной литературе немногочисленные данные получены по уравнениям идеального газа и, естественно, не могут быть использованы для точных расчетов.

Все сказанное выше указывает на своевременность проведенных работ, направленных на создание метода получения уравнений, отражающих свойства реальных газов и пригодных для экстраполяционных расчетов теплофизических свойств. Для этих расчетов целесообразно применять теоретически обоснованные уравнения, позволяющие рассчитывать любые теплофизические свойства газов, если известен закон межмолекулярного взаимодействия, и содержащие минимум неизвестных констант—параметров модельного потенциала.

В первом разделе справочника рассмотрены основные теоретические положения, на которых базируется настоящая работа, а также представлена разработанная авторами методика построения теоретически обоснованных уравнений состояния и уравнений для расчета свойств переноса.

В последующих разделах приведены таблицы теплофизических свойств одно-, двух- и многоатомных газов, а также даны соответствующие уравнения, по которым рассчитаны эти таблицы. В отдельный раздел выделены свойства водяного пара.

Таблицы рассчитаны до температур 2000—3000 К при давлениях до 100—400 МПа, за исключением таблиц фтора и водяного пара, где верхним пределом является температура начала разложения этих веществ.

Авторы будут признательны читателям за критические замечания и пожелания по улучшению книги, которые следует направлять в адрес издательства.

Авторы

Общие

- h — постоянная Планка
 k — постоянная Больцмана
 N — число Авогадро
 μ — масса моля, г/моль
 R — газовая постоянная
 e — заряд электрона
 σ, ϵ — параметры потенциальных функций межмолекулярного взаимодействия
 $b_0 = \frac{2}{3} \pi N \sigma^3$ — второй вириальный коэффициент для газа, состоящего из твердых сфер диаметра σ
 ϕ — потенциал межмолекулярного взаимодействия
 r — расстояние между центрами молекул
 g — ускорение свободного падения

Термодинамические свойства и свойства переноса

- p — давление, МПа
 T — абсолютная температура, К
 v — удельный объем
 ρ — плотность, кг/м³
 z — фактор сжимаемости
 u — внутренняя энергия
 $h(h^0)$ — энтальпия (в идеальном-газовом состоянии), кДж/кг
 c_v, c_p — изохорная и изобарная теплоемкости, кДж/(кг·К)
 c_v^0, c_p^0 — изохорная и изобарная теплоемкости в идеальном-газовом состоянии, кДж/(кг·К)
 $s(s^0)$ — энтропия (в стандартном состоянии), кДж/(кг·К)
 $a = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_s}$ — скорость звука, м/с
 $k = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$ — показатель адиабаты
 α/α_0 — относительный коэффициент объемного расширения
 B, C, D, E — вириальные коэффициенты в термическом уравнении состояния
 $\eta(\eta_0, \eta^{yn})$ — вязкость (при низкой плотности, при умеренной плотности), 10⁻⁷ Па·с
 $\lambda(\lambda_0, \lambda^{yn})$ — теплопроводность (при низкой плотности, при умеренной плотности), МВт/(м·К)
 Pr — число Прандтля
 B_η, C_η — вязкостные вириальные коэффициенты
 B_λ, C_λ — теплопроводностные вириальные коэффициенты

Средние квадратические погрешности аппроксимации данных

δz — о сжимаемости
 $\delta \eta$ — о вязкости
 $\delta \lambda$ — о теплопроводности

Приведенные величины

$T^* = T/(\epsilon/k)$ — температура

$B^* = B/b_0$, $C^* = C/b_0^2$,

$D^* = D/b_0^3$, $E^* = E/b_0^4$ — вириальные коэффициенты

$B_\eta^* = B_\eta/b_0$, $C_\eta^* = C_\eta/b_0^2$ — вязкостные вириальные коэффициенты

$B_\lambda^* = B_\lambda/b_0$, $C_\lambda^* = C_\lambda/b_0^2$ — теплопроводностные вириальные коэффициенты

Задача расчета таблиц теплофизических свойств газов при высоких параметрах за пределами области существования экспериментальных данных всегда актуальна вследствие естественной ограниченности области экспериментального исследования. Для расчета таких таблиц должны быть доказаны достоверность применяемых уравнений и пригодность их для экстраполяции.

Методы построения эмпирических уравнений состояния по экспериментальным данным достигли высокого совершенства. Использование вычислительных машин дает возможность быстро получить уравнение состояния с большим числом констант, действующее в широкой области параметров и описывающее экспериментальные данные с точностью, по крайней мере не хуже точности самих экспериментальных данных. Расчет полного набора термодинамических величин производится с помощью дифференциальных соотношений термодинамики и приводит к хорошей согласованности термических и калорических величин.

Однако возможность расчета по эмпирическому уравнению состояния ограничивается областью использованных экспериментальных данных. Экстраполяция эмпирического уравнения состояния за пределы экспериментально исследованной области не может считаться достаточно надежной. Ошибка в термодинамических свойствах будет тем больше, чем дальше область расчета от области, для которой есть экспериментальные данные.

Задача расчета термодинамических свойств в области экстраполяции может быть решена более надежно с помощью теоретически обоснованного уравнения состояния. Таким уравнением для газа является вириальное уравнение состояния, вириальные коэффициенты которого могут быть рассчитаны на основании принятых функций межмолекулярного взаимодействия, а параметры потенциала определяются из экспериментальных значений плотности.

Для того чтобы уравнение состояния было пригодно для экстраполяции, оно должно удовлетворять по крайней мере трем требованиям.

Во-первых, уравнение состояния должно быть теоретически обоснованным и из экспериментальных данных должны определяться лишь константы, имеющие ясный физический смысл.

Во-вторых, уравнение состояния должно описывать экспериментальные данные в широкой области параметров состояния с погрешностью, не превышающей погрешность самих экспериментальных данных.

В-третьих, при правильном выборе потенциальной функции взаимодействия молекул в исследуемом газе параметры этой функции должны быть постоянными, не зависящими от температуры, либо зависимость параметров потенциала от температуры должна быть теоретически обоснована.

Если эти три требования выполняются, то полученное уравнение состояния может быть использовано для расчета таблиц термодинамических свойств в области, существенно превосходящей по параметрам состояния область, исследованную экспериментально.

Все сказанное относится не только к термическому уравнению состояния (и к термодинамическим свойствам вообще), но и к уравнениям, описывающим свойства переноса. Иначе говоря, создание таблиц вязкости и теплопроводности газов в области экстраполяции должно базироваться на теоретически обоснованных уравнениях, удовлетворяющих упомянутым выше требованиям.

Сформулированные здесь положения являлись для авторов основными при создании настоящей монографии.

Методика составления уравнений для расчета теплофизических свойств газов

1.1. Построение теоретически обоснованного уравнения состояния

Предлагается следующий метод построения уравнения состояния в вириальной форме, реализованный для различных газов.

Пусть в некоторой области температур и давлений для данного вещества имеются экспериментальные значения в виде совокупности точек $\{p_k, v_k, T_k\}$, или $\{p_k, \rho_k, T_k\}$, или $\{z_k, \rho_k, T_k\}$, где $p_k, v_k, \rho_k, T_k, z_k$ — соответственно давление, удельный объем, плотность, температура и фактор сжимаемости в точке k .

Предполагается, что парное взаимодействие между молекулами данного вещества отображается каким-либо модельным потенциалом $\varphi=f(r)$, который может быть двух-, трех- и даже многопараметрическим. В случае двухпараметрического потенциала параметрами потенциала являются глубина потенциальной ямы ϵ и условный диаметр молекулы σ [$r=\sigma$ при $\varphi(r)=0$].

Теоретически обоснованным уравнением состояния сжатого газа является вириальное уравнение, т. е.

$$z = pv/(RT) = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + \dots \quad (1.1)$$

Используем общепринятые соотношения:

$$B^* = B/b_0; \quad C^* = C/b_0^2; \quad D^* = D/b_0^3; \dots; \\ T^* = T/(\epsilon/k); \quad b_0 = \frac{2}{3} \pi \sigma^3 N_A, \quad (1.2)$$

где $B^*, C^*, D^*, \dots$ — приведенные вириальные коэффициенты; T^* — приведенная температура; ϵ/k и b_0 — величины, связанные с параметрами потенциальной функции (остальные обозначения общеприняты). Уравнение состояния (1.1) может быть переписано следующим образом:

$$z = 1 + B^* b_0 \rho + C^* b_0^2 \rho^2 + D^* b_0^3 \rho^3 + \dots \quad (1.3)$$

Предполагаем далее, что имеются рассчитанные значения приведенных вириальных коэффициентов для выбранной потенциальной функции. Приведенные вириальные коэффициенты в (1.3) при выбранной потенциальной функции зависят только от приведенной температуры T^* .

С целью получения уравнения состояния (1.3) для данного конкретного газа необходимо произвести далее аппроксимацию табулированных значений вириальных коэффициентов в функции приведенной температуры, что может быть достаточно точно выполнено при использовании вычислительных машин. Тем самым будут получены функциональные зависимости B^*, C^*, D^* и т. д. от T^* , например в виде полиномов. После этого в уравнении состояния (1.3) остаются неизвестными параметры потенциала ϵ/k и b_0 или величины, пропорциональные им, и другие константы, если потенциал взаимодействия является многопараметрическим.

Эти параметры потенциала, входящие в (1.3), могут быть определены с привлечением экспериментальных данных о плотности из условия среднего квадратического приближения уравнения состояния (1.3) по всей совокупности экспериментальных данных о плотности, т. е. необходимо выполнить минимизацию функционала, определяющего сумму квадратов отклонений экспериментальных значений фактора сжимаемости z_k^2 от расчетных z_k^2 с учетом веса w_k каждой точки:

$$S = \sum_{k=1}^n w_k [z_k^2 - z_k^p]^2. \quad (1.4)$$

При этом будут решены одновременно две задачи: определены параметры модельного потенциала и получено уравнение состояния с наилучшим приближением к экспериментальным данным.

Наиболее простое решение получается при использовании двухпараметрического потенциала, а также и в том случае, если для многопараметрического потенциала дополнительные параметры выбираются заранее, например из данных о строении молекул исследуемого газа. В этих случаях в уравнении (1.3) определяются только значения ε/k и b_0 .

Изложенная выше методика определения параметров модельных потенциалов отличается от применявшихся ранее, в которых параметры потенциала определялись в основном из данных о втором вириальном коэффициенте или о дроссель-эффекте (равновесные свойства), либо из данных о свойствах переноса. В этих работах, в частности, при определении параметров потенциалов из второго вириального коэффициента вычисления производились либо методом отношений [1], либо графическим методом [2], развитым ранее Кеезом и Леннардом-Джонсом и описанным также в [3]. По мере распространения ЭВМ стало возможным обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и получать значения параметров потенциала с большой точностью, что явилось необходимым условием для получения точных теоретически обоснованных уравнений состояния газов.

В методе, предлагаемом в настоящей работе, определение параметров потенциала производится непосредственно из экспериментальных данных о плотности газа, при этом используется несколько вириальных коэффициентов, рассчитанных для выбранной модели потенциала, а вычисления выполняются с помощью метода наименьших квадратов.

Так как точность данных о плотности газа выше точности второго вириального коэффициента, дроссель-эффекта и вязкости, то метод определения параметров потенциала из данных о плотности может иметь преимущества с точки зрения точности вычисленных параметров потенциала.

Кроме того, можно отметить, что второй вириальный коэффициент вообще мало зависит от формы потенциальной кривой взаимодействия двух молекул, и поэтому возможны такие случаи, когда для описания второго вириального коэффициента подобрана потенциальная функция и определены ее параметры, а для описания третьего вириального коэффициента (и последующих), т. е. для построения уравнения состояния в целом, выбранная потенциальная функция непригодна ни с теми параметрами, которые определены из второго вириального коэффициента, ни с какими-либо другими. В качестве примера можно указать на данные, приведенные в работе Келла [4], в которой для аппроксимации измеренных значений второго вириального коэффициента водяного пара (низкие температуры) используется потенциал Штокмайера и определяются параметры потенциала. Однако найденные значения параметров оказались совершенно непригодными для вычисления третьего вириального коэффициента.

Метод определения параметров потенциала, предлагаемый в настоящем справочнике, свободен от этого недостатка, так как определение параметров потенциала производится с использованием нескольких вириальных коэффициентов.

Описанный в настоящем разделе метод построения теоретически обоснованного уравнения состояния все же является несколько упрощенным. Дополнительно необходимо еще учесть влияние неаддитивности энергии взаимодействия молекул при определении вириальных коэффициентов. Этот вопрос рассматривается ниже.

1.2. Выбор потенциала межмолекулярного взаимодействия. Вириальные коэффициенты

При выборе потенциала межмолекулярного взаимодействия исследователь сталкивается с ситуацией, которую можно считать противоречивой. Сущность

этого противоречия заключается в том, что для относительно простых потенциалов межмолекулярного взаимодействия выполнены многие расчеты, рассчитано большое число вириальных коэффициентов, и поэтому при использовании таких потенциалов рассчитанные таблицы теплофизических свойств охватывают большой диапазон по давлению. Сложные потенциалы межмолекулярного взаимодействия лучше отражают физическую природу парного взаимодействия молекул, т. е. теоретически лучше обоснованы, однако для таких потенциалов, как правило, расчетов сделано мало, и таблицы, которые можно рассчитать на базе применения таких потенциалов, являются существенно ограниченными.

Для расчета таблиц термодинамических свойств газов в области относительно высоких плотностей недостаточно знать только второй вириальный коэффициент или даже второй и третий; нужны еще и старшие вириальные коэффициенты, по крайней мере еще четвертый, а еще лучше четвертый и пятый. Кроме того, по-возможности желательно знать значения вкладов в третий вириальный коэффициент вследствие неаддитивности энергии взаимодействия.

Для расчета таблиц свойств переноса, в первую очередь вязкости и теплопроводности газов, необходимо знать соответствующие интегралы столкновений, второй и третий вязкостные вириальные коэффициенты и аналогичные коэффициенты для теплопроводности; последующие вириальные коэффициенты для вязкости и теплопроводности практически не нужны, так как зависимость вязкости и теплопроводности газа от плотности небольшая.

Таким образом, набор требуемых величин, которые должны быть рассчитаны на основании теоретических представлений на базе применения выбранного потенциала межмолекулярного взаимодействия, достаточно велик. Работа по расчету этих и некоторых других функций для различных потенциалов межмолекулярного взаимодействия проводится различными исследователями уже в течение нескольких десятилетий, однако вследствие сложности этих расчетов сделано не так уж много. Только для потенциала Леннарда-Джонса (12-6) произведены все упомянутые выше расчеты; для других функций межмолекулярного взаимодействия набор рассчитанных величин значительно меньше.

В настоящей работе потенциал Леннарда-Джонса (12-6) используется весьма активно. Он имеет вид

$$\phi(r) = 4\epsilon[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6], \quad (1.5)$$

где σ — значение r , при котором $\phi(r) = 0$, а ϵ — глубина потенциальной ямы, которая достигается при $r = 2^{1/6}\sigma$. Этот потенциал является одним из самых простых реалистических потенциалов. Энергия отталкивания в нем представлена степенной функцией, жестко определенной, а из дисперсионного ряда берется только один член с шестой степенью. Использование этого потенциала дает возможность рассчитывать термодинамические свойства, а также вязкость и теплопроводность газов при относительно высоких плотностях. Критерием возможности применения потенциала Леннарда-Джонса (12-6) к конкретному газу является качество аппроксимации термодинамических и переносных свойств в широком диапазоне температур и давлений.

Потенциал Леннарда-Джонса (12-6), естественно, не описывает электростатической составляющей межмолекулярного взаимодействия, и поэтому его нельзя применять для таких веществ, как, например, водяной пар, молекула которого обладает большим дипольным моментом. Но для многих одноатомных и двухатомных газов такой потенциал оказывается вполне применимым, несмотря на свою простоту. Тем не менее применение потенциала Леннарда-Джонса (12-6) даже для двухатомных газов требует особого подхода и некоторой осторожности, однако в плане поставленной задачи — экстраполяции теплофизических свойств в область высоких температур и давлений — решается просто. Особенностью многих двухатомных газов является то, что молекулы этих газов, не имея дипольного момента, обладают квадрупольным моментом. Квадрупольное взаимодействие не описывается потенциалом Леннарда-Джонса.

Однако хорошо известно, что средняя энергия квадрупольного взаимодействия пропорциональна $1/T$ и, следовательно, сказывается в основном при низких температурах [1]. В связи с этим для получения правильного уравнения состояния область экспериментальных данных, из которых определяются параметры потенциала Леннарда-Джонса, не должна охватывать низких температур; нижняя граница температуры определяется конкретным расчетом. Полученное при этом уравнение состояния будет, естественно, пригодно для экстраполяции в область высоких температур, где влияние квадрупольного взаимодействия практически не сказывается; однако при проведении расчетов по такому уравнению в области низких температур, например вблизи кривой насыщения, погрешность будет возрастать, что и соответствует теоретическим представлениям.

Зависимость приведенных вириальных коэффициентов, рассчитанных на основе потенциала Леннарда-Джонса (12-6), показана на рис. 1.1 в функции приведенной температуры. Третий, четвертый и пятый вириальные коэффициенты рассчитаны как аддитивные. Соответствующие таблицы даны в [1 и 5].

В настоящей работе используются также потенциал сферической оболочки (spherically shell - ss) и вириальные коэффициенты, рассчитанные для этого потенциала.

В работе де Рокко и Гувера [6] сообщается о применении потенциала ss для определения зависимости $B(T)$ неполярных и полярных многоатомных молекул. Здесь молекула представляется в виде сферы диаметром d , и взаимодействие этих условных сфер описывается потенциалом (12-6). Тогда

$$B_{ss} = \frac{2}{3} \pi N r_0^3 B_{ss}^*(r_0^*, T^*), \quad (1.6)$$

где $r_0^* = r_0/d$; $T^* = T/(\epsilon/k)$, а расстояние r_0 соответствует минимуму потенциальной энергии.

Потенциал ss трехпараметрический, и естественно, что он является более гибким потенциалом, чем потенциал Леннарда-Джонса (12-6). В работе [6] опубликованы таблицы приведенного вириального коэффициента B_{ss}^* для $T^* = 0,2 \div 400$ и $r_0^* = 1,2 \div 4,0$ и определены параметры потенциала ss для 24 веществ, из которых 5 полярных. В большинстве случаев потенциал ss дает заметно лучшие результаты, чем потенциал Леннарда-Джонса (12-6).

В [7] рассчитан аддитивный третий вириальный коэффициент потенциала ss для $r_0^* = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0$ в температурном интервале $T^* = 0,4 \div 10,0$. Для семи веществ сравниваются значения третьего вириального коэффициента, рассчитанные по параметрам, полученным из второго вириального коэффициента, с экспериментальными значениями C . Для простых веществ результаты расчета по потенциалам ss и (12-6) примерно однозначны, а для сложных — потенциал ss дает лучшее совпадение с экспериментом.

Авторы работы [8] рассчитали приведенный четвертый вириальный коэффициент для потенциала сферической оболочки при $r_0^* = 1,7$ и $2,5$ в интервале приведенной температуры $T^* = 0,55 \div 10,0$.

На рис. 1.2 1.4 представлены второй, третий и четвертый вириальные коэффициенты в зависимости от приведенной температуры для различных значений r_0^* . Кривые со значением $r_0^* = \infty$ относятся к потенциалу Леннарда-Джонса (12-6) ($d=0$).

Необходимо отметить, что третий параметр потенциала ss, диаметр d сферической оболочки, не является «свободным» параметром, а определяется геометрическим размером молекулы.

Наличие второго, третьего и четвертого вириальных коэффициентов для потенциала ss дает возможность получать уравнения состояния, действующие в достаточно широкой области изменения плотности. Этот потенциал целесообразно применять для газов с относительно большими (или сложными) молекулами, например для шестифтористой серы.

Для описания термодинамических свойств водяного пара в настоящей работе применен потенциал Кeesома, учитывающий диполь-дипольное взаимо-

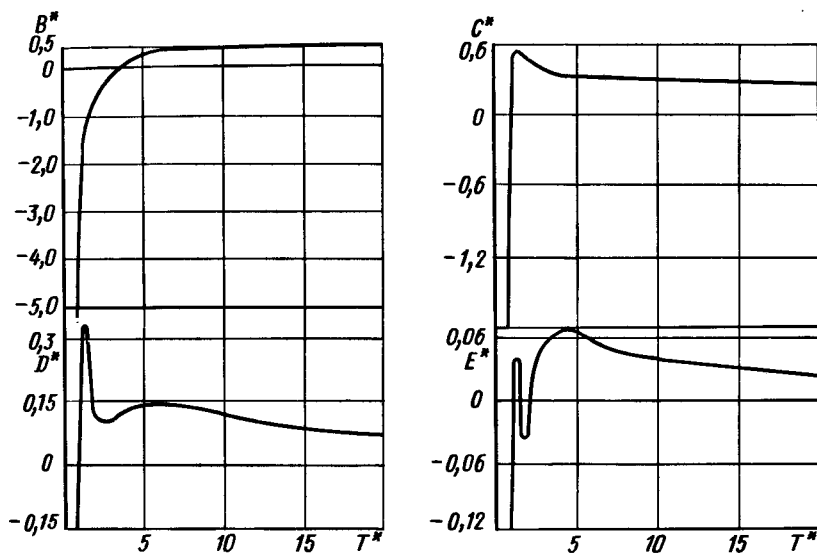


Рис. 1.1. Приведенные вириальные коэффициенты для потенциала Леннарда-Джонса (12-6)

действие молекул. Этот потенциал путем алгебраических преобразований удастся свести к потенциалу Леннарда-Джонса (12-6), но с переменными параметрами потенциала, однако в этом случае зависимость параметров потенциала от температуры оказывается теоретически строго обоснованной. Благодаря такому преобразованию потенциала Кeesома становится возможным использовать для построения уравнения состояния все вириальные коэффициенты, рассчитанные для потенциала Леннарда-Джонса (12-6).

Упомянутые выше три потенциала межмолекулярного взаимодействия и соответствующие вириальные коэффициенты использовались для построения уравнений состояния и уравнений свойств переноса в настоящей книге.

Другие потенциалы функции межмолекулярного взаимодействия, хотя и более совершенные, к сожалению, использовать в настоящее время пока не удастся при решении задачи расчета теплофизических свойств газов в широкой области плотностей по причинам, о которых говорилось выше.

В этой связи можно упомянуть еще о потенциале, который кажется весьма привлекательным — это потенциал (m -6-8), в котором отталкивательная часть представлена степенной функцией, но показатель степени можно изменять (он равен m). В дисперсионном ряде взят уже и второй член ряда с показателем, равным восьми. Несомненно, что такой потенциал более правильно отражает межмолекулярное взаимодействие, чем, например, потенциал Леннарда-Джонса (12-6). Однако для такого потенциала рассчитаны только второй вириальный коэффициент и интегралы столкновений. Если бы для какого-либо газа было построено уравнение состояния на базе применения этого потенциала, то неизбежно это уравнение было бы только лишь со вторым вириальным коэффициентом и применять его можно было бы для давлений примерно 2–3 МПа. Такой диапазон давлений слишком мал для нужд современной техники.

И еще один важный вопрос: какое влияние будет оказывать вид потенциала межмолекулярного взаимодействия на рассчитанные таблицы термодинамиче-

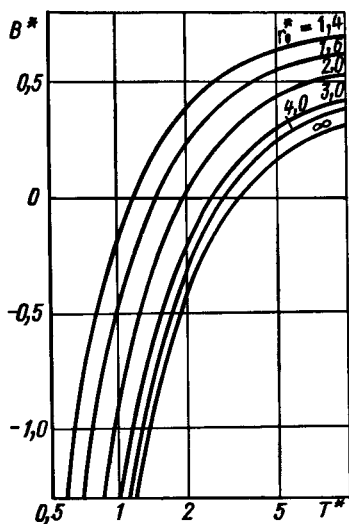


Рис. 1.2

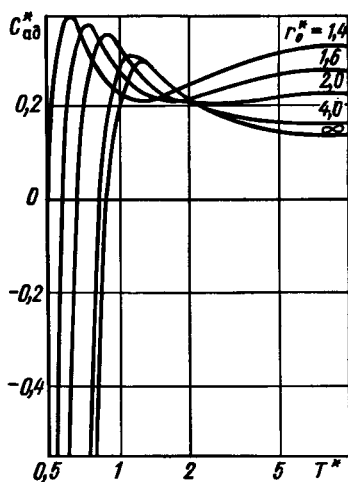


Рис. 1.3

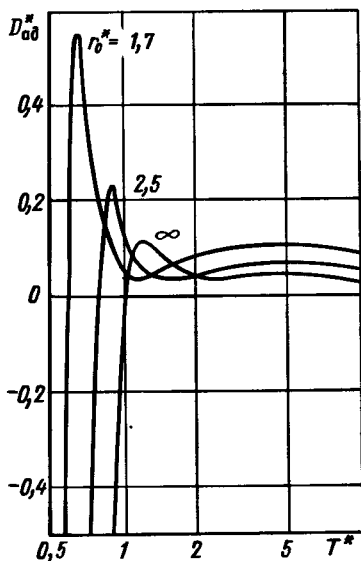


Рис. 1.4

Рис. 1.2. Приведенный второй вириальный коэффициент для потенциала сферической оболочки

Рис. 1.3. Приведенный третий вириальный коэффициент для потенциала сферической оболочки

Рис. 1.4. Приведенный четвертый вириальный коэффициент для потенциала сферической оболочки

ских (и переносных) свойств в области экстраполяции? Для ответа на этот вопрос (хотя бы частичного) для углекислого газа было получено уравнение состояния на базе потенциала Леннарда-Джонса (12-6), и потенциала сферической оболочки и далее сравнивались результаты расчета термодинамических свойств при высоких температурах и давлениях, т. е. в области экстраполяции. Это сравнение обсуждается в разделе о построении уравнения состояния углекислого газа. Однако здесь можно отметить, что расхождения в значениях термодинамических свойств в области экстраполяции невелики.

Последнее подтверждает надежность предлагаемых в этой книге таблиц.

1.3. Влияние неаддитивности в старших вириальных коэффициентах

Предложенный выше метод получения уравнения состояния основывается на использовании вириальных коэффициентов, рассчитанных в предположении аддитивности энергии взаимодействия. Между тем в применяемой методике определения параметров потенциалов, где используются не только второй, но и старшие вириальные коэффициенты, результаты расчета могут оказаться чувствительными к вкладам за счет неаддитивности в старших вириальных коэффициентах.

Влияние неаддитивности на значения старших вириальных коэффициентов в последние годы активно исследуется, но пока выполнены расчеты только для третьего вириального коэффициента.

Энергию взаимодействия трех атомов можно записать как

$$u_3 = u_{12} + u_{23} + u_{31} + \Delta u_3, \quad (1.7)$$

где Δu_3 — неаддитивная часть энергии взаимодействия.

В соответствии с этим третий вириальный коэффициент для потенциалов, не зависящих от углов, может быть представлен следующим образом:

$$C_3 = C_{\text{ад}} + \Delta C_3; \quad (1.8)$$

$$C_{\text{ад}} = -\frac{8\pi^2 N^2}{3} \iiint f_{12} f_{13} f_{23} r_{12} r_{13} r_{23} dr_{12} dr_{13} dr_{23}; \quad (1.9)$$

$$\Delta C_3 = -\frac{8\pi^2 N^2}{3} \iiint \exp\left(-\frac{\sum u_{ij}}{kT}\right) \left[\exp\left(-\frac{\Delta u_3}{kT}\right) - 1 \right] \times \\ \times r_{12} r_{13} r_{23} dr_{12} dr_{13} dr_{23}, \quad (1.10)$$

где

$$f_{ij} = \exp(-u_{ij}/(kT)) - 1; \quad (1.11)$$

$$\sum u_{ij} = u_{12} + u_{13} + u_{23}. \quad (1.12)$$

Неаддитивная часть энергии взаимодействия трех атомов может быть представлена как сумма неаддитивной дисперсионной энергии $\Delta u_{\text{дисп}}$ и энергии отталкивания $\Delta u_{\text{от}}$.

Неаддитивная часть дисперсионной энергии была получена Кихарой [9, 10] и рассмотрена также в других работах.

Выражение для неаддитивной дисперсионной энергии имеет вид

$$\Delta u_{\text{дисп}} = [v(r_{12} r_{13} r_{23})^3] (1 + 3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3), \quad (1.13)$$

где r_{12} , r_{13} , r_{23} , θ_1 , θ_2 , θ_3 — стороны и внутренние углы треугольника, образованного взаимодействующими атомами. Значение v индивидуально для каждого газа и связано с поляризуемостью α и дисперсионной константой c простым соотношением $v = 3/4\alpha c$.

Шервуд и Праунитц [11], основываясь на этой модели, рассчитали и протабулировали соответствующие функции, с помощью которых можно определить вклад в третий вириальный коэффициент от неаддитивной дисперсионной энергии. Расчеты были проведены для потенциала Кихары, потенциала $\exp-6$ и модели прямоугольной потенциальной ямы. Как предельный случай потенциала Кихары имеются расчеты и для модели Леннарда-Джонса (12-6).

Квантовомеханический расчет неаддитивной энергии отталкивания выполнили Розен [12] и Шостак [13] для одно- и двухэлектронных атомов. В дальнейшем Янсен и сотрудники [14] распространили результаты расчета на многоэлектронные атомы, используя упрощенную волновую функцию (модель Гаусса).

Шервуд, де Рокко и Мейсон [15] предложили простую модель для неаддитивной части трехчастичной энергии отталкивания — модель искажения.

Аналитические выражения для Δu_{oi} модели Гаусса и модели искажения не совпадают, однако результаты расчетов оказываются близкими.

В [15] получены функции, необходимые для определения вклада в третий вириальный коэффициент за счет неаддитивности части энергии отталкивания. Расчеты выполнены для двух моделей с использованием потенциалов Леннарда-Джонса (12-6) и (9-6).

Для конкретных расчетов уравнение (1.10) разлагается в двухпараметрический ряд Тейлора и используются первые слагаемые. Расчетная формула принимает вид

$$\frac{\Delta C_n}{b_0^2} \equiv \Delta C_n^* = \alpha^* \left(\frac{\partial \Delta C_n^*}{\partial \alpha^*} \right)_0 + \epsilon^{*1/2} \left[\frac{\partial \Delta C_n^*}{\partial (\epsilon^*)^{1/2}} \right], \quad (1.14)$$

где $\alpha^* = \alpha/\sigma^3$; $(\epsilon^*)^{1/2} = (\epsilon\sigma/e^2)^{1/2}$; α — поляризуемость; e — заряд электронов; σ , ϵ — параметры потенциала.

В уравнении (1.14) первое слагаемое представляет собой вклад в ΔC_n^* за счет дисперсионных сил, а второе — вклад за счет сил отталкивания.

В [15] приведены интегральные соотношения для $(\partial \Delta C_n^* / \partial \alpha^*)_0$ и $[\partial \Delta C_n^* / \partial (\epsilon^*)^{1/2}]_0$ и выполнен сравнительный расчет неаддитивного вклада в третий вириальный коэффициент для полного интеграла (1.10) и аппроксимации с помощью производных (1.14). В табл. 1.1 приводятся результаты этих расчетов.

Расчет был произведен для атомов, взаимодействующих по потенциалу Леннарда-Джонса (12-6) с использованием модели Гаусса, взяты следующие приведенные параметры: $\alpha^* = 0,05$; $(\epsilon^*)^{1/2} = 0,065$.

Из табл. 1.1 видно, что получается хорошее совпадение результатов практически при всех температурах, т. е. упрощенное уравнение (1.14) вполне пригодно для расчета неаддитивного вклада в третий вириальный коэффициент.

Таким образом, работы [11 и 15] дают необходимый материал для расчета вклада в третий вириальный коэффициент за счет неаддитивности энергии взаимодействия. Вместе с тем необходимо заметить, что теоретические модели дисперсионной и отталкивательной неаддитивности энергии созданы в основном для взаимодействия атомов, и применение разработанной методики для расчета взаимодействия молекул требует дополнительных пояснений.

Очевидно, что развитая в [9-11] теория расчета неаддитивной дисперсионной трехчастичной энергии может быть применена и для молекул со сферически-симметричной поляризуемостью.

Для молекул газов, для которых поляризуемость по осям отличается почти вдвое, можно использовать среднее значение поляризуемости, вычисляемое по обычному соотношению. Тогда теоретическое решение для дисперсионной энергии можно использовать, по-видимому, без изменений. Следует заметить, что такая методика уже применялась ранее, и ее можно считать общепринятой.

Так, Шервуд и Прауэнтц [11] вычислили вклады в третий вириальный коэффициент за счет неаддитивной дисперсионной энергии для ряда газов: Ag, N₂, Kr, CH₄, CO₂, Xe, CF₄ и др.

Таблица 1.1. Неаддитивный вклад в приведенный третий вириальный коэффициент

kT/ϵ	Интеграл (1.10)	Уравнение (1.14)
0,5	4,54	4,62
1,0	0,433	0,439
2,0	0,115	0,117
5,0	0,0311	0,0321
10,0	0,0116	0,0112

Несколько иначе обстоит дело с расчетом трехчастичной неаддитивной энергии для взаимодействия молекул на близких расстояниях (энергия отталкивания).

Модель Гаусса применима для взаимодействия многоэлектронных атомов, и возможность применения этой модели для молекул пока не обоснована. Можно лишь выполнить контрольные расчеты и оценить полученные результаты.

Использование модели искажения для взаимодействия молекул, напротив, является вполне целесообразным. Сущность модели [15] заключается в том, что при сближении двух атомов возникает деформация электронного облака атома и состояние такого атома аппроксимируется соответствующим диполем. Далее вычисляется энергия диполь-дипольного взаимодействия при отталкивании и эта энергия приравнивается к отталкивательной части парного потенциала.

Полученный результат применяется для расчета взаимодействия трех частиц, и вычисляется неаддитивный вклад в энергию.

Таким образом, характеристика взаимодействующих частиц заложена в используемом парном потенциале, и все приведенное в [15] рассмотрение будет справедливо и для молекул, если парное взаимодействие молекул отображается выбранным потенциалом.

В настоящей работе при получении уравнений состояния для газов с помощью минимизации функционала (1.4) третий вириальный коэффициент газов представлялся с учетом вклада от неаддитивности.

В четвертый вириальный коэффициент поправка на неаддитивность не вводилась, так как в настоящее время необходимая для этого теория еще не полностью разработана. Однако можно считать, что влияние такой поправки на всю систему расчета будет мало, так как сам вклад в уравнение состояния слагаемого с четвертым вириальным коэффициентом невелик.

1.4. Методика составления согласованных уравнений для расчета равновесных и неравновесных свойств газов

Методика получения согласованных уравнений теплофизических свойств газов разработана на основе предложенного выше способа получения теоретически обоснованного уравнения состояния. Сущность методики заключается в определении единых параметров потенциала межмолекулярного взаимодействия при совместной обработке данных о равновесных и неравновесных свойствах умеренно сжатых газов, при этом используется метод наименьших квадратов.

Для вязкости и теплопроводности газов в качестве теоретически обоснованных уравнений принимаются вириальные разложения по плотности. Возможность такого описания неоднократно обсуждалась, а иногда оспаривалась, но на сегодняшний день такое представление вязкости и теплопроводности умеренно сжатых газов является общепринятым [16—18]. Нами использовались уравнения с двумя вязкостными и двумя теплопроводностными вириальными коэффициентами.

Экспериментальные данные о неравновесных свойствах газов получены со значительно меньшей точностью, чем данные о плотности. Из них наиболее точно измерена вязкость и несколько менее точно теплопроводность газов. Другие неравновесные свойства газов измерены с погрешностями, в несколько раз превышающими погрешность вязкости и теплопроводности, поэтому использовать их для получения единых параметров потенциала нецелесообразно.

Для совместной обработки экспериментальных данных уравнения записываются следующим образом:
уравнение состояния

$$z^p = 1 + \sum_{i=2}^6 B_i^*(b_0 \rho)^{i-1}; \quad (1.15)$$

$$\eta^p = \eta_0 \left[1 + \sum_{i=2}^3 (B_{\eta}^*)_i (b_0 \rho)^{i-1} \right]; \quad (1.16)$$

уравнение теплопроводности

$$\lambda^p = \lambda_0 \left[1 + \sum_{i=2}^3 (B_{\lambda}^*)_i (b_0 \rho)^{i-1} \right]. \quad (1.17)$$

В этих уравнениях $(B_{\eta}^*)_i$ и $(B_{\lambda}^*)_i$ — приведенные вязкостные и теплопроводностные вириальные коэффициенты, рассчитанные на основе теоретических представлений.

Общий функционал, из которого путем минимизации определяются единые параметры потенциала, записывается аналогично (1.4), т. е.

$$S = \sum_{k=1}^{n_z} w_k^z [z_k^3 - z_k^p]^2 + \sum_{k=1}^{n_{\eta}} w_k^{\eta} [\eta_k^3 - \eta_k^p]^2 + \sum_{k=1}^{n_{\lambda}} w_k^{\lambda} [\lambda_k^3 - \lambda_k^p]^2, \quad (1.18)$$

где z^p , η^p , λ^p рассчитываются соответственно по (1.15), (1.16), (1.17).

Для выполнения необходимых расчетов по уравнению (1.18) необходимо располагать температурными зависимостями вязкостных и теплопроводных приведенных вириальных коэффициентов, а также интегралов столкновений, входящих в η_0 и λ_0 в уравнениях (1.16) и (1.17). Естественно, что для всех трех уравнений — (1.15), (1.16) и (1.17) — при всех расчетах должен быть использован один и тот же потенциал межмолекулярного взаимодействия.

В настоящее время разработано несколько моделей второго вязкостного вириального коэффициента. Все они основаны на применении потенциала Леннарда-Джонса (12-6). В [19] В. М. Кузнецовым проведено сравнение этих моделей и предложена новая модель. Показано, что новая модель второго вязкостного вириального коэффициента приводит к лучшему совпадению расчетных и экспериментальных данных. Совместная обработка данных о сжимаемости и вязкости по схеме уравнения (1.18), но без данных о теплопроводности проведена в [20]. Показано, что и в этом варианте обработки предпочтительнее использовать второй вязкостный вириальный коэффициент из [19]. В настоящей книге именно он и использовался. Третий вязкостный вириальный коэффициент, необходимый для расчетов по (1.18), принимался по [21].

Теоретический расчет теплопроводностных вириальных коэффициентов представляет собой более сложную задачу по сравнению с расчетом аналогичных коэффициентов для вязкости. Тем не менее есть несколько моделей второго теплопроводностного вириального коэффициента. Эти модели проанализированы в [22], и там же предложены автором собственные расчеты, которые использовались в настоящей книге. Третий теплопроводностный вириальный коэффициент принимался по данным уже упоминавшейся работы [21].

Отыскание параметров потенциала и получение соответствующих уравнений с помощью минимизации функционала (1.18) для разных газов в настоящей работе проводились по-разному. В тех случаях, когда это было возможно, функционал (1.18) использовался в полном объеме. Для других же газов функционал уменьшался до совместной обработки плотности и вязкости или даже до обработки только плотности (коэффициента сжимаемости).

1.5. Получение теоретически обоснованных уравнений теплофизических свойств газов путем переаппроксимации полученных ранее уравнений

Процесс получения теоретически обоснованных уравнений достаточно трудоемок и включает в себя все традиционные этапы, такие, как сбор

экспериментальных данных, их анализ и проверка взаимной согласованности, составление рабочих массивов, собственно получение уравнений при совместной обработке разнородных опытных данных и, наконец, анализ полученного решения.

С другой стороны, практически для всех исследуемых веществ к настоящему времени получены высокоточные эмпирические уравнения как равновесных, так и неравновесных свойств, отображающие существующие экспериментальные данные с погрешностью эксперимента, причем многие из таблиц данных, рассчитанных по таким уравнениям, утверждены в Государственной службе стандартных справочных данных (ГСССД) в качестве Стандартных справочных данных (ССД) и Рекомендуемых справочных данных (РСД). Составление этих уравнений включало те же этапы, что и вышеприведенные для теоретически обоснованных уравнений.

Поскольку при составлении и теоретически обоснованных и эмпирических уравнений используются практически одни и те же экспериментальные данные, представляется возможным использовать имеющиеся эмпирические уравнения для получения единых параметров потенциала межмолекулярного взаимодействия, по крайней мере для таких свойств, как вязкость и теплопроводность, не отличающихся высокой точностью. При этом можно одновременно решить две задачи: уточнить параметры потенциала, полученные ранее только из p_vT -данных, и проверить взаимное соответствие теоретических и эмпирических уравнений.

Существующие эмпирические уравнения теплофизических свойств в исследуемой области параметров состояния в подавляющем большинстве случаев представляют собой непрерывные дифференцируемые функции. Поэтому значительно проще и удобнее искать параметры потенциала, минимизируя среднюю квадратическую длину между теоретически обоснованным и эмпирическими уравнениями не по точкам, а в среднем по непрерывному промежутку, используя метод переаппроксимации функций, предложенный в [23]. Такая операция для уравнения состояния была апробирована в [24] и привела к положительным результатам.

Суть метода заключается в том, что теоретически обоснованные уравнения ищутся путем подбора таких значений параметров потенциала, чтобы соблюдалось равенство

$$I = \int \int_{p_n, T_n}^{p_k, T_k} w [y_n - y_k]^2 dT dp, \quad (1.19)$$

где y_n , y_k — исходное и теоретически обоснованное уравнения исследуемого свойства; w — весовая функция, имеющая наименьшее значение в заданном прямоугольнике $[T_n - T_k, p_n - p_k]$, меньшем, чем область определения исходного уравнения y_n (индексы «н» и «к» соответствуют начальным и конечным параметрам).

В случае совместной обработки разнородных данных требуется минимизировать совместный интеграл вида

$$I = \sum_{j=1}^{N_p} \alpha_j \int \int_{p_{nj}, T_{nj}}^{p_{kj}, T_{kj}} w_j [y_{nj} - y_{kj}]^2 dT dp, \quad (1.20)$$

где N_p — число исследуемых свойств; α_j — параметр нормировки. Для получения достоверного результата наиболее эффективным способом требуется правильно выбрать α_j и w_j .

Множитель α_j устанавливает соответствие между областями интегрирования для различных свойств. По-видимому, наиболее рационально выбрать в качестве множителей $\alpha_j = 1 / [(T_{kj} - T_{nj})(p_{kj} - p_{nj})]$ для уравнения состояния и уравнений вязкости и теплопроводности газа умеренной плотности, которые являются функциями двух переменных, и $\alpha_j = 1 / (T_{kj} - T_{nj})$ для уравнений вязкости и теплопроводности разреженного газа, т. е. минимизировать не квадратичные функционалы в обычном смысле, а сумму средних квадратических

отклонений по каждому свойству. Такая нормировка приводит к независимости результата от области определения эмпирических уравнений и числа независимых переменных в уравнениях.

Весовая функция w_j устанавливает соответствие между точностью используемых эмпирических уравнений. Обычно применяемое в дискретном случае соотношение $w_k = 1/(\delta_j y_k)^2$ с постоянной относительной погрешностью δ_j для каждого свойства крайне нежелательно в непрерывном случае, так как содержит сложную функцию параметров состояния y_k в знаменателе, что приводит чаще всего к невозможности определения приведенных выше интегралов аналитически, и требуется численное интегрирование, т. е. расчет по совокупности точек, что сводит на нет достоинства метода переаппроксимации непрерывных функций. С другой стороны, при таких параметрах состояния, которые изучаются в настоящей работе (высокие температуры и невысокие плотности), изменения исследуемых величин в зависимости от параметров относительно невелики. Поэтому без большой ошибки можно воспользоваться постоянными для каждого свойства весами, роль которых сводится к согласованию исследуемых свойств между собой с точки зрения их погрешностей и численных значений. Поэтому для каждого свойства предварительно рассчитывались соответствующие значения по формуле

$$w_j = \left[\frac{\int_{\rho_{kj}}^{\rho_{kj}} \int_{T_{kj}}^{T_{kj}} y_{kj} dT d\rho}{\delta_j (T_{kj} - T_{kj})(\rho_{kj} - \rho_{kj})} \right]^{-2},$$

которые использовались в выражении (1.20).

В качестве исследуемых свойств приняты: фактор сжимаемости z , коэффициенты динамической вязкости разреженного η_0 и умеренно плотного η газа, коэффициенты теплопроводности разреженного λ_0 и умеренно плотного λ газа. Разделение коэффициентов переноса на две составляющие обусловлено различием температурных диапазонов для каждой из составляющих, которые часто присутствуют в соответствующих эмпирических уравнениях.

Наиболее распространенной формой уравнения состояния в отечественной практике является двойной ряд по плотности и температуре, аналогичный по форме вириальному уравнению состояния:

$$z = 1 + \sum_{j=1}^{M_z} (b_j w^j / \tau^j) = \sum_{j=1}^{M_z} (b_j \rho^j / T^j), \quad (1.21)$$

где $b_j = b_j' T_{кр}^j / \rho_{кр}^j$, причем $\tau = T/T_{кр}$, $w = \rho/\rho_{кр}$ — приведенные температура и плотность ($T_{кр}$, $\rho_{кр}$ — критические температура и плотность).

В современных справочных изданиях температурные зависимости коэффициентов вязкости и теплопроводности разреженных газов описываются различными функциональными соотношениями, однако анализ показал, что наиболее рациональной формой уравнений для этих свойств являются зависимости вида

$$\eta_0 = \sum_{j=1}^{M_{\eta_0}} a_j' \tau^{q_j/2}, \quad (1.22)$$

которые пригодны для отображения кинетических коэффициентов в широкой области температур с небольшим количеством коэффициентов.

В подавляющем большинстве эмпирические уравнения вязкости и теплопроводности для сжатых газов и жидкости представляют собой уравнения в виде избыточных функций

$$\Delta\eta = \eta - \eta_0 = \sum_{j=1}^{M_{\eta}} c_j' \frac{w^j}{\tau^j} = \sum_{j=1}^{M_{\eta}} c_j \frac{\rho^j}{T^j}, \quad (1.23)$$

которые с минимальным числом эмпирических коэффициентов отображают как сжатый газ, так и сжатую жидкость.

Уравнения вида (1.22) и (1.23) используются для описания коэффициента теплопроводности.

Для удобства интегрирования теоретически обоснованные уравнения представлены в измененном виде: теоретически обоснованное вириальное уравнение состояния (1.3), имеющее форму, аналогичную (1.21), принято без изменения. Уравнение для вязкости разреженного газа представлено в виде

$$\eta_0 = A_\eta \sqrt{T} b_0^{-2/3} \frac{f_\eta}{\Omega^{(2.2)*}(T^*)}, \quad (1.24)$$

$$\text{где } A_\eta = \frac{26,693 \sqrt{\mu}}{(3\mu/(2\pi N_A))^{2/3}}.$$

В качестве зависимости интегралов столкновения использовалось соотношение

$$\begin{aligned} f_\eta/\Omega^{(2.2)*} = & -1,22045/T^{*2.5} + 4,68010/T^{*2} - 6,53540/T^{*1.5} + \\ & + 4,19488/T^* - 1,98282/T^{*0.5} + 1,44483 + \\ & + 4,92685 \cdot 10^{-2} T^{*0.5} - 6,17871 \cdot 10^{-4} T^*, \end{aligned}$$

отображающее табличные значения [1] в области $T^* = 0,7 \div 400$ со средней квадратической погрешностью 0,04%.

Уравнение вязкости умеренно плотного газа представляется в виде избыточной функции

$$\Delta\eta = \eta - \eta_0 = A_\eta \sqrt{T} \sum_{i=2}^3 B'_{\eta i} (b_0 \rho)^{i-1}, \quad (1.25)$$

где $B'_{\eta i} = B_{\eta i}^* f_\eta / \Omega^{(2.2)*}$. Зависимости новых вириальных коэффициентов $B'_{\eta i}$ аппроксимировались полиномами, в результате чего расчетная формула для теоретически обоснованного уравнения избыточной вязкости имеет вид

$$\Delta\eta = A_\eta \sum_{j=1}^{M_\eta} d_j b_0^{r_j-2/3} (\epsilon/k)^{t_j} t_j \rho^{r_j} T^{0.5-t_j}. \quad (1.26)$$

Коэффициент теплопроводности разреженного газа имеет вид

$$\lambda_0 = \frac{15R}{4\mu} \eta_0 \kappa(T^*) \beta(T^*), \quad (1.27)$$

причем функция $\beta(T^*) = 1$ для одноатомного газа. Для многоатомных газов $\beta(T^*) \neq 1$ и зависит от индивидуальных особенностей молекул конкретного вещества [22]. Зависимость этой функции от приведенной температуры отображалась для каждого газа полиномом по обратным степеням приведенной температуры.

Выражение для избыточной теплопроводности аналогично (1.25), однако в данном случае

$$B'_{\lambda i} = B_{\lambda i}^* \frac{f_\eta \kappa \beta}{\Omega^{(2.2)*}} \text{ и } A_\lambda = A_\eta \frac{15R}{4\mu}. \quad (1.28)$$

Полученные ранее табличные значения вторых и третьих вириальных коэффициентов для вязкости и теплопроводности и табличные значения интегралов столкновения [1] использованы для получения опорных значений функций B'_η и B'_λ , которые описывались затем сплайн-функциями третьего порядка. По этим соотношениям рассчитаны таблицы значений указанных

функций в интервале $T^* = 0,7 \div 200$, которые впоследствии отображены соответствующими полиномами. Коэффициенты и степени аргументов в этих полиномах приводятся в последующих разделах. Погрешность описания опорных значений полиномами не превышает 0,1%.

Следует отметить, что зависимость B'_{12} для многоатомных газов необходимо получать в каждом конкретном случае.

Приведенная совокупность расчетных формул для эмпирических и теоретически обоснованных уравнений позволила построить алгоритм и программу определения параметров потенциала при минимизации интеграла (1.20), причем все необходимые интегралы брались аналитически, а полученные соотношения имели относительно простой вид и представляли собой одинаковые по структуре соотношения.

Резюмируя сказанное, перечислим основные этапы получения теоретически обоснованных уравнений методом аналитической переаппроксимации эмпирических функций:

- 1) переаппроксимируются теоретически обоснованные и эмпирические уравнения состояния, а также эмпирические уравнения вязкости разреженного и умеренно плотного газа;
- 2) полученные в п. 1 параметры потенциала используют для расчета функций $\beta(T^*)$ и $B_{11}(T^*)$;
- 3) производится совместная переаппроксимация всех свойств для получения окончательных значений параметров потенциала;
- 4) осуществляется анализ полученного решения.

1.6. Расчет таблиц теплофизических свойств газов

Приведем формулы, с помощью которых рассчитаны таблицы термодинамических свойств и свойств переноса газов.

Уравнение состояния и производные

$$p = RT\rho + RTB^*b_0\rho^2 + RTC^*b_0^2\rho^3 + RTD^*b_0^3\rho^4 + RTE^*b_0^4\rho^5; \quad (1.29)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = R\rho + R\frac{d}{dT}(B^*b_0T)\rho^2 + R\frac{d}{dT}(C^*b_0^2T)\rho^3 + R\frac{d}{dT}(D^*b_0^3T)\rho^4 + R\frac{d}{dT}(E^*b_0^4T)\rho^5; \quad (1.30)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -RT\rho^2 - 2RTB^*b_0\rho^3 - 3RTC^*b_0^2\rho^4 - 4RTD^*b_0^3\rho^5 - 5RTE^*b_0^4\rho^6. \quad (1.31)$$

Энтальпия

$$h = h^0 - RT + \frac{p}{\rho} + \int_{\infty}^v \left[-p + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] dv, \quad (1.32)$$

или

$$h = h^0 - RT + \frac{p}{\rho} - RT^2 \frac{d}{dT}(B^*b_0)\rho - \frac{1}{2}RT^2 \frac{d}{dT}(C^*b_0^2)\rho^2 - \frac{1}{3}RT^2 \frac{d}{dT}(D^*b_0^3)\rho^3 - \frac{1}{4}RT^2 \frac{d}{dT}(E^*b_0^4)\rho^4. \quad (1.33)$$

$$s = s^0 + \int_{v_0}^{\infty} \left(\frac{\partial p_{\text{ид}}}{\partial T} \right)_v dv + \int_{\infty}^v \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv, \quad (1.34)$$

или

$$s = s^0 + R \ln \frac{\rho_0}{\rho} - R \frac{d}{dT} (B^* b_0 T) \rho - \frac{1}{2} R \frac{d}{dT} (C^* b_0^2 T) \rho^2 - \\ - \frac{1}{3} R \frac{d}{dT} (D^* b_0^3 T) \rho^3 - \frac{1}{4} R \frac{d}{dT} (E^* b_0^4 T) \rho^4, \quad (1.35)$$

где $\rho_0 = \rho_0/(RT)$; $p_0 = 1,01325$ бар.

Изохорная теплоемкость

$$c_v = c_v^0 + \int_{\infty}^v T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v dv, \quad (1.36)$$

или

$$c_v = c_v^0 - RT \frac{d^2}{dT^2} (B^* b_0 T) \rho - \frac{1}{2} RT \frac{d^2}{dT^2} (C^* b_0^2 T) \rho^2 - \\ - \frac{1}{3} RT \frac{d^2}{dT^2} (D^* b_0^3 T) \rho^3 - \frac{1}{4} RT \frac{d^2}{dT^2} (E^* b_0^4 T) \rho^4. \quad (1.37)$$

Изобарная теплоемкость

$$c_p = c_v - T \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v^2}{\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T}. \quad (1.38)$$

Показатель адиабаты

$$k = - \frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s; \quad (1.39)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T; \quad (1.40)$$

$$k = - \frac{v}{p} \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T. \quad (1.41)$$

Скорость звука

$$a = \sqrt{-v^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s} = \sqrt{k p v}. \quad (1.42)$$

В формулах (1.29) (1.42) аппроксимация приведенных вириальных коэффициентов B^* , $C_{\text{н}}^*$, D^* , E^* , а также аппроксимация идеально-газовых функций h^0 , c_v^0 , s^0 (s^0 — в стандартном состоянии) приводится для каждого газа в соответствующих разделах книги, посвященных конкретному газу.

Производные от приведенных вириальных коэффициентов по температуре или от соответствующих комплексов по температуре вида $\frac{d}{dT}(B^*b_0T)$ вычисляются достаточно просто с учетом упомянутой выше аппроксимации и в пределах настоящей книги подробно не расписываются.

Параметр потенциальной функции для молекул, состоящих из твердых сфер, $b_0 = \frac{2}{3}\pi N\sigma^3$ для большинства газов имеет постоянное значение, однако для водяно-

го пара, где при конкретных расчетах от потенциала Кeesома приходится переходить к потенциалу Леннарда-Джонса (12-6), этот коэффициент b_0 зависит от температуры, что и нашло свое отражение в записи соответствующих производных.

Вязкость (коэффициент динамической вязкости)

$$\eta = \eta_0(1 + B_\eta^*b_0\rho + C_\eta^*b_0^2\rho^2). \quad (1.43)$$

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности)

$$\lambda = \lambda_0(1 + B_\lambda^*b_0\rho + C_\lambda^*b_0^2\rho^2). \quad (1.44)$$

Число Прандтля

$$Pr = \eta c_p / \lambda. \quad (1.45)$$

Относительный коэффициент объемного расширения равен α/α_0 , где $\alpha_0 = 1/T$.

В формулах (1.43) — (1.45) аппроксимация приведенных вириальных коэффициентов для вязкости и теплопроводности соответственно B_η^* , C_η^* , B_λ^* , C_λ^* , а также аппроксимация вязкости η_0 и теплопроводности λ_0 при низкой плотности даны для каждого газа в соответствующих разделах книги.

1.7. Оценка погрешности значений, приведенных в таблицах теплофизических свойств газов

Оценка погрешности табличных значений коэффициента сжимаемости или плотности в той области, где есть экспериментальные данные, не представляет трудности. Для каждого газа в соответствующих разделах приведена средняя квадратическая погрешность аппроксимации полученными уравнениями состояния экспериментальных данных о факторе сжимаемости, что и дает исчерпывающую информацию по этому вопросу. Для всех газов получены уравнения состояния высокой точности, и средняя квадратическая погрешность для большинства газов $z = 0,05 \div 0,15\%$. При такой высокой точности уравнения состояния рассчитанные значения калорических величин для умеренно сжатого газа получаются точные и достоверные, что хорошо известно специалистам, работающим в области составления таблиц свойств газов.

Настоящая книга посвящена в основном расчету таблиц термодинамических и переносных свойств газов в области высоких температур и давлений, за пределами области существования экспериментальных данных, и поэтому здесь целесообразно произвести оценку погрешности приводимых в таблицах значений в области экстраполяции.

Как уже отмечалось, из экспериментальных данных при составлении уравнения состояния определяются две или три константы — параметры потенциала. В частности, при использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6) определяются параметры ϵ/k и b_0 . В дальнейшем все расчеты термических, калорических и переносных свойств ведутся с использованием этих констант.

Отсюда следует, что погрешность всех рассчитываемых в области экстраполяции значений будет определяться погрешностью параметров потенциала и ошибками отнесения при расчете плотности*.

* Вопрос о том, какое влияние на расчетные значения может оказать применение какого-либо другого потенциала молекулярного взаимодействия и к каким погрешностям это приведет, рассмотрен далее.

В соответствии с этим при расчете максимальных значений погрешности коэффициента сжимаемости и какой-либо калорической величины, например энтальпии (при пренебрежимо малой погрешности идеально-газовых функций), могут быть использованы соотношения

$$\Delta z = \left| \left(\frac{\partial z}{\partial (\epsilon/k)} \right)_{b_0} \right| \Delta(\epsilon/k) + \left| \left(\frac{\partial z}{\partial b_0} \right)_{\epsilon/k} \right| \Delta b_0; \quad (1.46)$$

$$\Delta h = \left| \left(\frac{\partial h}{\partial (\epsilon/k)} \right)_{b_0} \right| \Delta(\epsilon/k) + \left| \left(\frac{\partial h}{\partial b_0} \right)_{\epsilon/k} \right| \Delta b_0 + \left| \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_{\epsilon/k, b_0} \right| \Delta \rho, \quad (1.47)$$

где знаком Δ обозначена абсолютная погрешность. При вычислении средней квадратической погрешности этих же величин можно применить формулы

$$\Delta z = k \sqrt{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial (\epsilon/k)} \right)_{b_0} \Delta(\epsilon/k) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial z}{\partial b_0} \right)_{\epsilon/k} \Delta b_0 \right]^2}; \quad (1.48)$$

$$\Delta h = k \sqrt{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial (\epsilon/k)} \right)_{b_0} \Delta(\epsilon/k) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial z}{\partial b_0} \right)_{\epsilon/k} \Delta b_0 \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial z}{\partial \rho} \right)_{\epsilon/k, b_0} \Delta \rho \right]^2}. \quad (1.49)$$

В связи с изложенным целесообразно привести вычисление (или, точнее говоря, оценку) погрешности параметров потенциала; такая оценка приводится здесь как пример при составлении уравнения состояния воздуха.

В применяемом методе определения параметров потенциала источниками погрешностей в вычисленных значениях параметров могут быть: случайные и систематические ошибки в экспериментальных данных; ограниченная точность расчета поправки на неаддитивность в приведенном третьем вириальном коэффициенте; возможное небольшое изменение параметров потенциала от температуры.

Рассмотрим подробно все эти источники погрешностей и сами погрешности.

Параметры потенциала и их средние квадратические погрешности из решения задачи минимизации функционала определены следующим образом:

$$\epsilon/k = (100,88 \pm 0,05) \text{ К}; \quad b_0 = (2,0246 \pm 0,0007) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1.50)$$

Средняя квадратическая погрешность определения параметров, указанная здесь, учитывает случайные погрешности в экспериментальных данных, и при этом учитывается влияние корреляции при определении параметров потенциала.

Максимально возможная погрешность определения параметров, вызванная этими причинами, будет, естественно, больше; с вероятностью 99,7% она должна быть втрое больше.

Таким образом, получаем

$$\Delta(\epsilon/k) = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ К}; \quad \Delta b_0 = 3 \cdot 0,0007 \cdot 10^{-3} = 0,0021 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Погрешность определения параметров, связанную с неточностью расчета поправок на неаддитивность в старших вириальных коэффициентах, можно оценивать только за счет вклада в третий вириальный коэффициент (ранее было упомянуто, что для четвертого и пятого вириальных коэффициентов нет никаких данных для выполнения этих или каких-либо других расчетов).

Так как при решении задачи минимизации функционала при использовании неаддитивного третьего вириального коэффициента параметры потенциала отличаются от значений (1.50) (они равны соответственно 100,07 К и $2,0092 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$), то приближенно можно принять линейный характер изменения параметров потенциала от вклада за счет неаддитивности в третьем вириальном коэффициенте. Этот вклад (ΔC_n^*) вычисляется, по-видимому, с точностью не хуже 15%. Тогда погрешность в определении ϵ/k , вызванная этой причиной, будет $\Delta(\epsilon/k) = 0,15(100,88 - 100,07) = 0,12 \text{ К}$, а погрешность

для b_0 определится как $\Delta b_0 = 0,15(2,0246 - 2,0092) \cdot 10^{-3} = 0,0023 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Наибольший интерес представляет собой оценка ошибки в определенных параметрах потенциала за счет имеющихся в экспериментальных данных систематических погрешностей. Все приведенные выше материалы не дают возможности произвести такую оценку. Эта ошибка будет зависеть от характера распределения систематических погрешностей по всей совокупности экспериментальных данных и их значений; ни то, ни другое точно не известно. Поэтому попытка решения этого вопроса может быть связана с какими-либо моделями величин и характера распределения систематических ошибок, для чего был проведен так называемый машинный эксперимент.

Сущность его заключалась в том, что в экспериментальные данные для воздуха, которые использовались для определения параметров потенциала, дополнительно вносилась определенная систематическая погрешность. При этом термодинамическая поверхность искажалась, и далее производилось определение параметров потенциала. Было составлено несколько вариантов программы искажения термодинамической поверхности, в которых производился пересчет всех (или части) экспериментальных данных, после чего управление в ЭВМ передавалось на программу определения параметров потенциала [т. е. программу минимизации функционала (1.4)] и определялись параметры потенциала уже из условия искаженной термодинамической поверхности.

Всего было выполнено 14 вариантов расчета; в первых семи вариантах искажению подвергались все экспериментальные значения (число точек 258), в последующих вариантах характер искажения был идентичный, однако пересчету подвергались примерно 3/5 экспериментальных значений, а 2/5 оставались не пересчитанными, тем самым в этих вариантах термодинамическая поверхность получалась как бы ступенчатой.

Программа определения параметров потенциала использует для каждой экспериментальной точки совокупность величин $z = p/(\rho RT)$, ρ и T и включает следующие варианты:

№ 1: систематическая ошибка вносится исключительно за счет погрешности измерения давления, которая равна 0,05%; это приводит к изменению фактора сжимаемости; он был увеличен на 0,05%; плотность и температура оставались без изменения;

№ 2: систематическая ошибка вносится исключительно за счет погрешности измерения плотности, например за счет погрешности определения объема пьезометра, и равна 0,02%; в связи с этим плотность уменьшалась на 0,02, а фактор сжимаемости увеличивался на 0,02%; температура не изменялась;

№ 3: характер погрешности тождествен погрешности в варианте № 2, но принималось большее значение погрешности — 0,05%; плотность уменьшалась на 0,05, фактор z увеличивался на 0,05%; температура не изменялась;

№ 4: систематическая ошибка имеет такой характер — плотность увеличивается на 0,05%; это благоприятный вариант, при котором изменяется только плотность на 0,05%, а фактор сжимаемости остается без изменений; температура также не меняется;

№ 5: систематическая погрешность получается за счет ошибок в давлении и плотности, но рассматривается наихудший случай, когда плотность уменьшается на 0,05, а давление оказывается увеличенным на 0,05%; при этом фактор сжимаемости увеличивается на 0,1%, температура остается без изменений;

№ 6: систематическая ошибка вносится только лишь за счет погрешности в измерении температуры и равна 0,05%; температура для всех точек увеличивается на 0,05, z уменьшается на 0,05%, а плотность остается без изменений;

№ 7: в этом варианте рассмотрен наихудший и практически очень маловероятный случай искажения, когда принимается, что ошибка вносится за счет погрешности p , ρ и T , причем плотность уменьшается на 0,05, температура уменьшается на 0,05%, и с учетом того, чтобы получить наихудший вариант, предполагается, что давление возрастает на 0,05%, что приводит к увеличению коэффициента сжимаемости на 0,15%.

Таблица 1.2. Параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для воздуха, определяемые при введении систематических погрешностей в экспериментальные данные

Номер варианта	z	ρ	T	ϵ/k , К	$b_0 \cdot 10^3$, м ³ /кг	σ , Å
0	—	—	—	100,88	2,0246	3,595
1	↑	—	—	100,74	2,0273	3,597
2	↑	↓	—	100,82	2,0261	3,596
3	↑	↓	—	100,74	2,0283	3,598
4	—	↓	—	100,88	2,0236	3,595
5	↑	↓	—	100,59	2,0311	3,599
6	↑	—	↑	101,08	2,0219	3,594
7	↑	↑	↓	100,40	2,0338	3,601
8	↑	—	—	100,61	2,0238	3,595
9	↑	↓	—	100,76	2,0244	3,595
10	↑	↓	—	100,58	2,0241	3,595
11	—	↓	—	100,91	2,0244	3,595
12	↑	↓	—	100,31	2,0233	3,595
13	↑	—	↑	101,21	2,0256	3,596
14	↑	↓	↓	99,97	2,0223	3,594

Примечание. ↑—увеличение; ↓—уменьшение; 1Å=10⁻¹⁰ м.

В последующих семи вариантах, как уже говорилось, искажения те же, но пересчитывается часть точек (изотермы низких температур).

Результаты определения параметров потенциала в 14 вариантах искажения термодинамической поверхности представлены в табл. 1.2. В качестве нулевого варианта искажения приведены параметры уравнения (1.50), в котором никаких искажений не вводилось.

Таблица 1.2 дает наглядное представление о том, как будут зависеть параметры потенциала от наличия систематических погрешностей в экспериментальных данных. Надо, однако, иметь в виду, что в нулевом варианте расчета в табл. 1.2 в экспериментальных данных уже содержится некоторая систематическая погрешность и все остальные варианты расчета эту погрешность увеличивают.

В целом табл. 1.2 показывает, что в пределах принятых изменений z , ρ и T параметры потенциала меняются незначительно; наибольшее изменение параметров наблюдается в вариантах № 14 (для ϵ/k) и № 7 (для b_0), что и ожидалось из характера искажений термодинамической поверхности для этих вариантов. По сравнению с параметрами потенциала, полученными без искажения (вариант № 0 в табл. 1.2), наибольшие отклонения параметров в вариантах № 7 и 14 составляют

$$\Delta(\epsilon/k)=0,91 \text{ К}; \Delta b_0=0,0092 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; \Delta\sigma=0,006 \text{ Å}. \quad (1.51)$$

Как уже говорилось, характер и значения искажения экспериментальных данных, принятые в вариантах № 7 и 14, маловероятны, и поэтому маловероятными являются и значительные отклонения параметров в этих вариантах (1.51).

Вместе с тем ясно, что просчитанные 14 вариантов далеко не исчерпывают всех возможных распределений систематических погрешностей экспериментальных данных; различные закономерности в характере распределения погрешностей могут быть так разнообразны, что даже при просчете очень большого числа вариантов действительное распределение систематических погрешностей не будет угадано ни в одном из вариантов расчета.

В связи с этим в качестве погрешностей определения параметров потенциала за счет систематических ошибок в экспериментальных данных принимаются наибольшие значения (1.51).

Основываясь на приведенных выше данных, можно уже определить суммарную погрешность, которая для ϵ/k будет: $\Delta(\epsilon/k) = 0,15 + 0,12 + 0,91 = 1,18$ К; для $b_0 \cdot \Delta b_0 = (0,0021 + 0,0023 + 0,0092) \cdot 10^{-3} = 0,0136 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Как видно, наибольший вклад в ошибку определения параметров потенциала получается за счет систематических погрешностей.

Окончательно параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для воздуха могут быть представлены так:

$$\begin{aligned} \epsilon/k &= (100,88 \pm 1,18) \text{ К}; \quad b_0 = (2,0246 \pm 0,0136) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; \\ \sigma &= (3,595 \pm 0,009) \text{ \AA}. \end{aligned} \quad (1.52)$$

Теперь необходимо оценить влияние возможной зависимости параметров потенциала от температуры.

Высокая точность уравниваний состояния, получающихся для всех исследованных в настоящей работе газов, уже говорит о том, что в пределах того температурного интервала, в котором заключены принимавшиеся к обработке экспериментальные данные, зависимость параметров потенциала от температуры отсутствует. Дополнительно к этому для некоторых газов параметры потенциала определялись не только из совокупности большого числа экспериментальных данных, но и из данных на каждой изотерме в отдельности [25]. Такой анализ также показал отсутствие зависимости параметров потенциала от температуры.

Вместе с тем необходимо отметить, что имеются отдельные теоретические работы, где исследуется вопрос о возможной зависимости параметров потенциала от температуры, например [26 и 27]. Подход к решению этой задачи в упомянутых работах различный. В [27] не содержится окончательного результата, который может быть использован для расчета, но возможное изменение параметров потенциала оценивается в несколько процентов. В [26] отмечается также возможность небольшого изменения параметров потенциала; зависимость ϵ/k от температуры связывается с изменением поляризуемости молекул. Хотя в [26] имеется конкретное решение, использовать его вряд ли целесообразно, так как расчет параметров потенциала через поляризуемость вообще не приводит к хорошим результатам. Так, известно, что расчет константы дисперсионной энергии с использованием поляризуемости дает для кислорода и азота значения, в 2 раза большие по сравнению со значением $4\epsilon\sigma^6$, получаемым из анализа теплофизических величин [1]. В связи с этим выводы, получающиеся на основании небольших изменений поляризуемости, вряд ли пока следует учитывать.

Таким образом, нельзя считать, что в настоящее время решение задачи зависимости параметров потенциала от температуры является исчерпывающим, однако ясно, что изменение параметров потенциала невелико и может проявиться лишь при очень высоких температурах.

В связи с этим параметры потенциала принимаются постоянными, но погрешность параметров при высоких температурах принимается большая, чем указана в (1.52). Можно считать, что при 1500 и 2000 К погрешность параметров потенциала следует увеличить на 1 и 2% соответственно. Значения этих погрешностей приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Погрешности параметров потенциала

Параметр	1000 К	1500 К	2000 К
$\Delta(\epsilon/k)$, К	1,18	2,19	3,20
$\Delta b_0 \cdot 10^3$, м ³ /кг	0,0136	0,0338	0,0540

Таблица 1.4. Погрешность расчета фактора сжимаемости

Производные и погрешность	Параметры состояния			
	$p, \text{МПа}$	1000 К	1500 К	2000 К
$\frac{\partial z}{\partial(\epsilon/k)}, 1/\text{K}$		-0,00044	-0,00012	-0,00004
$\frac{\partial z}{\partial b_0}, \text{г/см}^3$	50	0,0986	0,0650	0,0477
Δz		0,00186 (0,16%)	0,00246 (0,22%)	0,00270 (0,25%)
$\frac{\partial z}{\partial(\epsilon/k)}, 1/\text{K}$		-0,00062	-0,00015	-0,00004
$\frac{\partial z}{\partial b_0}, \text{г/см}^3$	100	0,229	0,141	0,101
Δz		0,00383 (0,29%)	0,00510 (0,41%)	0,00558 (0,47%)
$\frac{\partial z}{\partial(\epsilon/k)}, 1/\text{K}$			-0,00012	0
$\frac{\partial z}{\partial b_0}, \text{г/см}^3$	150	—	0,227	0,160
Δz			0,00794 (0,59%)	0,00864 (0,68%)

Принимая эти значения погрешностей параметров потенциала, можно рассчитать погрешность всех термодинамических и переносных величин в области экстраполяции.

В табл. 1.4 приведены результаты расчета максимально возможной погрешности фактора сжимаемости для воздуха [формула (1.46)].

Из табл. 1.4 видно, что эти погрешности в общем невелики. Обращает на себя внимание, что в точке 50 МПа и 1000 К, непосредственно примыкающей к области экспериментального исследования, где при расчете Δz погрешности ϵ/k и b_0 были взяты по (1.52), получилась погрешность $\delta z = 0,16\%$, что вполне соответствует точности экспериментальных данных, положенных в основу получения уравнения состояния и определения параметров потенциала.

Средняя квадратическая погрешность фактора сжимаемости, вычисленная по формуле (1.48) с вероятностью 0,95, будет примерно в 1,5 раза меньше значений, указанных в табл. 1.4.

Погрешность расчета калорических функций может быть получена с помощью формул типа (1.47) и (1.49).

Теперь представляется возможным дать некоторую общую оценку погрешности приведенных в таблицах значений термодинамических величин для всех газов.

Так как полученные уравнения состояния газов имеют примерно одинаковую точность и основной вклад в погрешность определения параметров потенциала вносит систематическая погрешность, влияние которой изучается с помощью искажения термодинамической поверхности, то можно приблизительно для всех газов принять одинаковые погрешности табличных значений (разумеется, это не точный расчет, однако дает общее представление о точности

таблиц в области экстраполяции): $\delta z = 0,2 \div 0,7\%$; $\Delta h = 3 \div 6$ кДж/кг; $\Delta s = 0,02 \div 0,04$ кДж/(кг · К); $\delta c_p = 0,3 \div 0,8\%$; $\delta c_v = 0,3 \div 0,8\%$; $\delta a = 0,3 \div 1\%$; $\delta k = 0,2 \div 1\%$.

Максимальные значения указанных погрешностей относятся к большим давлениям. Все приведенные значения имеют смысл максимально возможных погрешностей. Средние квадратические погрешности при вероятности 0,95 будут примерно в 1,5 раза меньше.

Необходимо, однако, учесть, что при использовании различных потенциалов межмолекулярного взаимодействия табличные величины в области экстраполяции будут все же различаться.

Как уже упоминалось, соответствующий анализ проведен для диоксида углерода; он показывает, что вид потенциала все же оказывает влияние на термодинамические свойства. И это обстоятельство также следует учитывать при оценке точности таблиц.

Оценка табличных значений вязкости и теплопроводности производилась также по методу, изложенному выше, т. е. на основании погрешностей параметров потенциала. Дополнительным здесь является влияние погрешностей параметров потенциала на вязкость и теплопроводность при низкой плотности.

Анализ и расчеты показывают, что можно рекомендовать следующие погрешности: $\delta \eta = 1 \div 3\%$; $\delta \lambda = 2 \div 5\%$.

Раздел второй

Одноатомные газы

2.1. Аргон

Перечень и краткая характеристика основных работ, содержащих экспериментальные данные о плотности аргона в газообразном состоянии, представлены в табл. 2.1.

Подробный анализ указанных в табл. 2.1 работ выполнен в монографии [33], поэтому здесь приведем лишь краткие сведения о них.

Наиболее тщательное экспериментальное исследование сжимаемости аргона выполнено в Амстердамской лаборатории Михельсом с соавторами [30, 31].

Таблица 2.1. Экспериментальные исследования плотности аргона в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Автор	Литературный источник
173,15—223,15	2,0—10	Хольборн, Отто (1924)	[28]
573,15—673,15	2,6—10	Хольборн, Отто (1924)	[29]
273,15—423,15	2,0—290	Михельс, Виджикер (1949)	[30]
118,15—248,15	0,7—105	Михельс, Левельт, де Граф (1958)	[31]
573,15—1223,15	2,5—100	Лекок (1960)	[32]
302,05—673,57	10—53,5	Рабинович (1976)	[33]

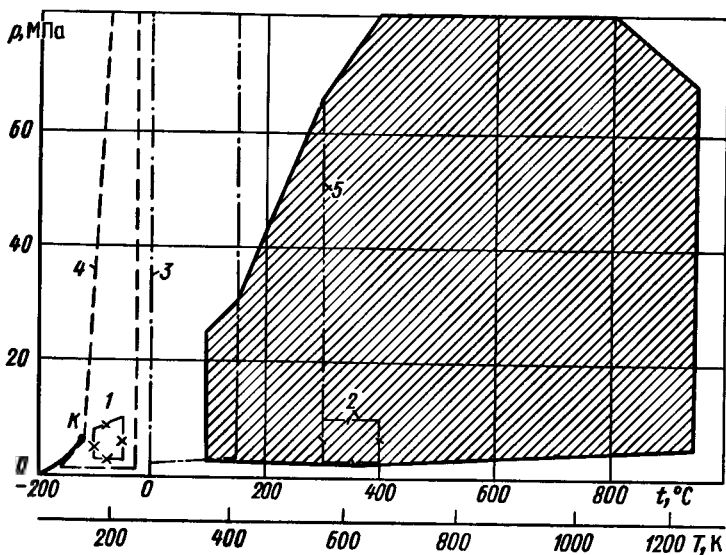


Рис. 2.1. Область обработки данных о сжимаемости газообразного аргона: 1 — [28]; 2 — [29]; 3 — [30]; 4 — [31]; 5 — [32]

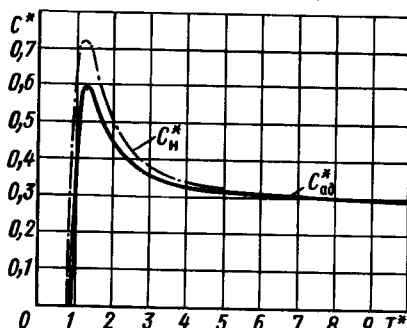


Рис. 2.2. Неаддитивный третий виральный коэффициент аргона C_{III}^*

Работы охватывают широкий диапазон параметров состояния. По оценке авторов, погрешность определения сжимаемости составляет 0,1%.

Хольборн и Отто исследовали область температур 173,15—673,15 К при давлениях до 10 МПа [28, 29].

Обширная область параметров состояния исследована Лекоком [32]. Данные о сжимаемости аргона представлены на шести изотермах (573,15; 673,15; 773,15; 923,15; 1073,15; 1223,15 К).

Таким образом, для получения уравнения аргона имеются экспериментальные данные, охватывающие интервал температур от кривой насыщения до 1223,15 К. Предварительная обработка показала, что достаточно точное описание экспериментальных данных при использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6) получается в области температур выше 373,15 К.

Для получения уравнения состояния аргона использованы 184 экспериментальные точки: 16 точек Хольборна и Отто на изотермах 573,15 и 673,15 К; 42 точки Михельса на изотермах 373,15; 398,15 и 423,15 К и 126 точек Лекока на изотермах 573,15; 673,15; 773,15; 923,15; 1073,15 и 1223,15 К.

На рис. 2.1 представлены области параметров состояния аргона, исследованные в названных выше экспериментальных работах. Заштрихована область экспериментальных данных, использованных для получения уравнения состояния аргона вида (1.3).

Уравнение состояния аргона получено на основе сферически симметричного потенциала Леннарда-Джонса (12-6). Для аппроксимации вириальных коэффициентов использованы табулированные значения второго и третьего вириальных коэффициентов из [1], а значения четвертого и пятого вириальных коэффициентов — из [5]. Аппроксимация B^* , C^* , D^* и E^* произведена в интервале приведенных температур $1 < T^* < 20$ полиномами вида

$$B^* = \sum_{i=0}^8 a_i (1/T^*)^i; \quad (2.1)$$

$$C^* = \sum_{i=0}^7 c_i (1/T^*)^i; \quad (2.2)$$

$$D^* = \sum_{i=0}^8 d_i (1/T^*)^i; \quad (2.3)$$

$$E^* = \sum_{i=0}^8 e_i (1/T^*)^i. \quad (2.4)$$

В третий вириальный коэффициент введена поправка на неаддитивность для аргона, рассчитанная по материалам [11 и 15]. На рис. 2.2 представлены третий аддитивный и третий неаддитивный вириальные коэффициенты аргона.

В результате обработки экспериментальных данных о сжимаемости в указанной области параметров состояния получены две константы уравнения состояния аргона, являющиеся параметрами потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = 118,839805$ К; $b_0 = 1,20169149 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных о факторе сжимаемости аргона полученным уравнением состояния составляет 0,17%, причем данные Михельса описываются со средней квадратической погрешностью 0,06, данные Хольборна и Отто — 0,07 и данные Лекока — с погрешностью 0,2%. Наибольшие отклонения уравнения от данных Лекока (до 0,4%) наблюдаются при максимальной температуре эксперимента 1223,15 К. На низкую точность экспериментальных данных в этой области указывается в [33]. Необходимо указать на возрастание погрешности уравнения в области температур 300—400° С при повышенных плотностях $\rho > 300$ кг/м³ (данные Лекока), что, очевидно, объясняется отсутствием в уравнении состояния вириальных коэффициентов более высокого порядка.

Таблицы теплофизических свойств аргона рассчитывались по теоретически обоснованным уравнениям, полученным в результате совместной обработки данных о сжимаемости, вязкости и теплопроводности аргона. Обработка данных производилась по методике, изложенной в § 1.5.

Для получения единых констант потенциала Леннарда-Джонса использованы описанное выше теоретически обоснованное уравнение состояния аргона, данные о вязкости и теплопроводности при атмосферном давлении из [34], о вязкости при повышенном давлении из [33] и о теплопроводности при повышенном давлении из [35].

Для расчета неравновесных свойств газов при низком давлении использовано уравнение вязкости по теории Чепмена—Энскога (1.24) и уравнение теплопроводности по теории Мейсона и Мончика (1.27), для расчета вязкости и теплопроводности при повышенном давлении — соответствующие вириальные уравнения (1.25) и (1.28). Так как для вязкости и теплопроводности учитывались вторые и третьи вириальные коэффициенты, то в развернутом виде уравнения имеют вид (1.43) и (1.44). Как указывалось в § 1.5, целесообразно производить аппроксимацию функций, имеющих теоретический смысл, совместно, а именно следующим образом:

$$\frac{f_{\eta}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{i=1}^8 g_i \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{r_i}; \quad (2.5)$$

$$B'_{\eta} = \frac{B_{\eta}^* f_{\eta}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{i=1}^{11} k_i \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{s_i}; \quad (2.6)$$

$$C'_{\eta} = \frac{C_{\eta}^* f_{\eta}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{i=1}^{10} l_i \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{t_i}; \quad (2.7)$$

$$B'_{\lambda} = \frac{B_{\lambda}^* f_{\lambda}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{j=1}^8 p_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{s_j}; \quad (2.8)$$

$$C'_{\lambda} = \frac{C_{\lambda}^* f_{\lambda}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{j=1}^6 q_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{t_j}. \quad (2.9)$$

Для аппроксимации использованы температурные зависимости вязкостных и теплопроводностных вириальных коэффициентов по [19, 21, 22]. Константы аппроксимации в выражениях (2.5)–(2.9) приведены ниже.

Получены следующие значения единых констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для аргона: $\varepsilon/k = 119,2246$ К; $b_0 = 1,203736 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Эти константы мало отличаются от констант, полученных при обработке только данных о сжимаемости.

Средняя квадратическая погрешность аппроксимации данных:

$$\delta z = 0,18; \delta \eta_0 = 0,52; \delta \eta = 1,55; \delta \lambda_0 = 0,52; \delta \lambda = 2,3\%.$$

По уравнениям равновесных и неравновесных свойств с едиными параметрами потенциала рассчитаны таблицы теплофизических свойств аргона. Предварительно получены выражения для расчета термодинамических функций аргона в идеально-газовом состоянии.

Для аргона, как и для других инертных газов, характерным является постоянное значение теплоемкости c_p^0 в широкой области температур. По данным [36] значение комплекса $c_p^0/R = 2,5$ для аргона в интервале от 10 до 5000 К. Изменение теплоемкости c_p^0 происходит при таких низких температурах, что при вычислении энтальпии это изменение можно не учитывать. Если считать теплоемкость постоянной при температуре от 0 К, то получим

$$\frac{h^0 - h_0^0}{RT_0} = \int_0^T \frac{c_p^0 dT}{RT_0} = \frac{2,5T}{T_0}. \quad (2.10)$$

При температуре 10 К по формуле (2.10) получается значение $(h^0 - h_0^0)/(RT_0) = 0,091521$, а по таблицам [36] — 0,0915, т. е. использование формулы (2.10) возможно.

За начало отсчета энтальпии принимается состояние кристалла при 0 К. По данным [37], теплота сублимации аргона при 0 К $\Delta h_0^0 = 1,9555 \cdot 10^5$ Дж/кг. Для расчета энтальпии используется выражение

$$\frac{h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0}{RT} = 2,5 + \frac{\Delta h_0^0}{1000R} \tau, \quad (2.11)$$

где $\tau = 1000/T$.

Величина s^0/R определяется по формуле

$$\frac{s^0}{R} = \frac{s_{10K}^0}{R} + \int_{10}^T \frac{c_p^0 dT}{RT} = \left(\frac{s^0}{R} \right)_{10K} + \frac{c_p^0}{R} \ln \frac{T}{10}. \quad (2.12)$$

С учетом констант, приведенных в [36], имеем

$$s^0/R = 10,1240 + 2,5 \ln(T/10). \quad (2.13)$$

Уравнение (2.13) справедливо в интервале от 10 до 5000 К. Кроме того, зависимость s^0/R для аргона аппроксимирована полиномом по данным [36]:

$$s^0/R = \sum_{j=0}^n \gamma_j (1000/T)^j. \quad (2.14)$$

Значения констант аппроксимации s^0/R для аргона следующие:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 2,69264808 \cdot 10^1 & \gamma_4 &= 9,06186613 \cdot 10^{-1} \\ \gamma_1 &= -9,97752008 \cdot 10^0 & \gamma_5 &= -1,40342931 \cdot 10^{-1} \\ \gamma_2 &= 7,22580653 \cdot 10^0 & \gamma_6 &= 1,13190043 \cdot 10^{-2} \\ \gamma_3 &= -3,32965419 \cdot 10^0 & \gamma_7 &= -3,65077460 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Значения основных величин, используемые при расчете таблиц теплофизических свойств аргона:

масса моля $\mu = 39,948$ г/моль;

газовая постоянная $R = 208,13$ Дж/(кг·К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 1,9555 \cdot 10^5$ Дж/кг;

единицы константы потенциала (12-6): $\epsilon/k = 119,2246$ К;

$b_0 = 1,203736 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Константы аппроксимации имеют следующие значения:

К формулам (2.1) — (2.4)

$$\begin{aligned} a_0 &= 5,14179079 \cdot 10^{-1} & c_0 &= 1,58114841 \cdot 10^{-1} \\ a_1 &= 1,46420188 \cdot 10^0 & c_1 &= 2,10728947 \cdot 10^0 \\ a_2 &= -3,11062641 \cdot 10^1 & c_2 &= -1,32119213 \cdot 10^1 \\ a_3 &= 1,51620881 \cdot 10^2 & c_3 &= 4,94468889 \cdot 10^1 \\ a_4 &= -4,94070800 \cdot 10^2 & c_4 &= -1,02432585 \cdot 10^2 \\ a_5 &= 1,04961498 \cdot 10^3 & c_5 &= 1,26401036 \cdot 10^2 \\ a_6 &= -1,43669241 \cdot 10^3 & c_6 &= -8,56652489 \cdot 10^1 \\ a_7 &= 1,21716145 \cdot 10^3 & c_7 &= 2,38276808 \cdot 10^1 \\ a_8 &= -5,79192806 \cdot 10^2 & & \\ a_9 &= 1,18148532 \cdot 10^2 & & \\ d_0 &= 2,50212469 \cdot 10^{-2} & e_0 &= 7,99684022 \cdot 10^{-3} \\ d_1 &= 1,51900944 \cdot 10^0 & e_1 &= 7,91478261 \cdot 10^{-1} \\ d_2 &= -8,06786698 \cdot 10^0 & e_2 &= -5,99482127 \cdot 10^0 \\ d_3 &= 2,38961138 \cdot 10^1 & e_3 &= 4,26004629 \cdot 10^1 \\ d_4 &= -5,45403437 \cdot 10^1 & e_4 &= -1,88313831 \cdot 10^2 \\ d_5 &= 9,25036101 \cdot 10^1 & e_5 &= 4,70151097 \cdot 10^2 \\ d_6 &= -9,55177058 \cdot 10^1 & e_6 &= -6,92035610 \cdot 10^2 \\ d_7 &= 5,70594052 \cdot 10^1 & e_7 &= 5,68607770 \cdot 10^2 \\ d_8 &= -1,71539946 \cdot 10^1 & e_8 &= -1,98570830 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

К формуле (2.5)

$$\begin{aligned} g_1 &= -1,22045 \cdot 10^0 & r_1 &= 2,5 \\ g_2 &= 4,68010 \cdot 10^0 & r_2 &= 2,0 \\ g_3 &= -6,53540 \cdot 10^0 & r_3 &= 1,5 \\ g_4 &= 4,19488 \cdot 10^0 & r_4 &= 1,0 \\ g_5 &= -1,98282 \cdot 10^0 & r_5 &= 0,5 \\ g_6 &= 1,44483 \cdot 10^0 & r_6 &= 0,0 \\ g_7 &= 4,92685 \cdot 10^{-2} & r_7 &= -0,5 \\ g_8 &= -6,17871 \cdot 10^{-4} & r_8 &= -1,0 \end{aligned}$$

К формуле (2.6)

$$\begin{aligned} k_1 &= -6,51897 \cdot 10^1 & s_1 &= 4,0 \\ k_2 &= 2,54454 \cdot 10^2 & s_2 &= 3,5 \end{aligned}$$

К формуле (2.7)

$$\begin{aligned} l_1 &= -1,16685 \cdot 10^1 & t_1 &= 3,0 \\ l_2 &= 5,38523 \cdot 10^1 & t_2 &= 2,5 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{llll}
k_3 = -3,13193 \cdot 10^2 & s_3 = 3,0 & l_3 = -9,83885 \cdot 10^1 & t_3 = 2,0 \\
k_4 = 3,38983 \cdot 10^2 & s_4 = 2,0 & l_4 = 9,22737 \cdot 10^1 & t_4 = 1,5 \\
k_5 = -3,41858 \cdot 10^2 & s_5 = 1,5 & l_5 = -4,80846 \cdot 10^1 & t_5 = 1,0 \\
k_6 = 1,62041 \cdot 10^2 & s_6 = 1,0 & l_6 = 1,46332 \cdot 10^1 & t_6 = 0,5 \\
k_7 = -4,09400 \cdot 10^1 & s_7 = 0,5 & l_7 = -1,99835 \cdot 10^0 & t_7 = -0,0 \\
k_8 = 5,82260 \cdot 10^0 & s_8 = 0,0 & l_8 = 1,67771 \cdot 10^{-1} & t_8 = -0,5 \\
k_9 = 4,79449 \cdot 10^{-1} & s_9 = -0,5 & l_9 = -6,57338 \cdot 10^{-3} & t_9 = -1,0 \\
k_{10} = 1,95736 \cdot 10^{-2} & s_{10} = -1,0 & l_{10} = 1,02584 \cdot 10^{-4} & t_{10} = -1,5 \\
k_{11} = -3,16747 \cdot 10^{-4} & s_{11} = -1,5 & &
\end{array}$$

К формуле (2.8)

$$\begin{array}{ll}
p_1 = 1,20573 \cdot 10^1 & s_1 = 4,0 \\
p_2 = -7,44267 \cdot 10^1 & s_2 = 3,0 \\
p_3 = 1,12312 \cdot 10^2 & s_3 = 2,5 \\
p_4 = -6,30885 \cdot 10^1 & s_4 = 2,0 \\
p_5 = 1,25337 \cdot 10^1 & s_5 = 1,5 \\
p_6 = 1,18204 \cdot 10^0 & s_6 = 0,5 \\
p_7 = 1,01562 \cdot 10^{-2} & s_7 = -0,5 \\
p_8 = -1,68201 \cdot 10^{-4} & s_8 = -1,0
\end{array}$$

К формуле (2.9)

$$\begin{array}{ll}
q_1 = -1,27852 \cdot 10^2 & t_1 = +3,5 \\
q_2 = 3,05458 \cdot 10^2 & t_2 = +3,0 \\
q_3 = -2,22070 \cdot 10^2 & t_3 = +2,5 \\
q_4 = 7,14507 \cdot 10^1 & t_4 = +1,5 \\
q_5 = -3,44833 \cdot 10^1 & t_5 = +1,0 \\
q_6 = 7,75479 \cdot 10^0 & t_6 = +0,5 \\
q_7 = -4,91426 \cdot 10^1 & t_7 = 0,0 \\
q_8 = 1,70520 \cdot 10^{-2} & t_8 = -0,5
\end{array}$$

Рассчитанные значения теплофизических свойств аргона приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2. Аргон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 500 \text{ K}$						
0,1	0,96	1,0002	455,7	4,145	0,312	0,521
1,0	9,59	1,0017	455,2	3,664	0,313	0,524
2,0	19,15	1,0035	454,6	3,519	0,313	0,527
3,0	28,67	1,0054	454,1	3,433	0,314	0,531
4,0	38,16	1,0074	453,5	3,372	0,314	0,534
5,0	47,60	1,0095	453,0	3,324	0,314	0,537
6,0	57,00	1,0116	452,5	3,284	0,315	0,540
8,0	75,66	1,0161	451,5	3,222	0,316	0,547
10,0	94,12	1,0210	450,6	3,173	0,317	0,553
12,0	112,38	1,0261	449,8	3,132	0,317	0,559
16,0	148,21	1,0374	448,2	3,067	0,319	0,570
20,0	183,08	1,0498	446,9	3,016	0,321	0,581
25,0	225,19	1,0668	445,5	2,964	0,322	0,593
30,0	265,58	1,0855	444,4	2,921	0,324	0,603
35,0	304,23	1,1055	443,6	2,884	0,326	0,612
40,0	341,14	1,1268	443,1	2,852	0,328	0,620
45,0	376,32	1,1491	442,8	2,824	0,329	0,627
$T = 600 \text{ K}$						
0,1	0,80	1,0002	507,7	4,240	0,312	0,521
1,0	7,99	1,0024	507,5	3,760	0,313	0,523
2,0	15,94	1,0048	507,2	3,615	0,313	0,525
3,0	23,85	1,0073	506,9	3,529	0,313	0,527
4,0	31,72	1,0099	506,7	3,468	0,313	0,529
5,0	39,55	1,0125	506,4	3,421	0,314	0,531
6,0	47,33	1,0151	506,2	3,382	0,314	0,534
8,0	62,78	1,0205	505,7	3,320	0,315	0,538
10,0	78,04	1,0261	505,3	3,272	0,315	0,542
12,0	93,13	1,0318	504,9	3,233	0,316	0,546

Арзон

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
16,0	122,75	1,0438	504,3	3,169	0,317	0,553
20,0	151,60	1,0564	503,8	3,120	0,318	0,560
25,0	186,57	1,0731	503,4	3,070	0,320	0,568
30,0	220,30	1,0905	503,2	3,028	0,321	0,575
35,0	252,79	1,1087	503,1	2,993	0,323	0,582
40,0	284,06	1,1276	503,3	2,962	0,324	0,588
45,0	314,13	1,1472	503,6	2,935	0,325	0,593
50,0	343,03	1,1672	504,1	2,910	0,327	0,598
60,0	397,52	1,2087	505,6	2,868	0,329	0,606

T = 700 K

0,1	0,69	1,0003	559,8	4,320	0,312	0,520
1,0	6,85	1,0026	559,7	3,840	0,312	0,522
2,0	13,66	1,0053	559,6	3,695	0,313	0,524
3,0	20,43	1,0079	559,5	3,610	0,313	0,525
4,0	27,17	1,0106	559,4	3,550	0,313	0,527
5,0	33,87	1,0133	559,4	3,503	0,313	0,528
6,0	40,53	1,0161	559,3	3,464	0,314	0,530
8,0	53,75	1,0217	559,2	3,403	0,314	0,533
10,0	66,81	1,0274	559,1	3,355	0,315	0,536
12,0	79,72	1,0331	559,1	3,316	0,315	0,538
16,0	105,09	1,0450	559,1	3,254	0,316	0,544
20,0	129,84	1,0572	559,2	3,205	0,317	0,549
25,0	159,92	1,0730	559,5	3,156	0,318	0,555
30,0	189,04	1,0893	559,9	3,116	0,320	0,560
35,0	217,22	1,1060	560,4	3,081	0,321	0,565
40,0	244,47	1,1231	561,1	3,051	0,322	0,569
45,0	270,81	1,1405	561,9	3,025	0,323	0,574
50,0	296,28	1,1583	562,8	3,001	0,324	0,577
60,0	344,70	1,1948	565,0	2,959	0,326	0,584
70,0	389,96	1,2321	567,5	2,924	0,329	0,590

T = 800 K

0,1	0,60	1,0003	611,8	4,390	0,312	0,520
1,0	5,99	1,0026	611,9	3,910	0,312	0,522
2,0	11,95	1,0053	611,9	3,765	0,313	0,523
3,0	17,88	1,0079	612,0	3,680	0,313	0,524
4,0	23,77	1,0106	612,0	3,620	0,313	0,525
5,0	29,63	1,0133	612,1	3,573	0,313	0,526
6,0	35,47	1,0161	612,2	3,535	0,314	0,527
8,0	47,03	1,0215	612,3	3,474	0,314	0,530
10,0	58,48	1,0271	612,5	3,427	0,314	0,532
12,0	69,79	1,0327	612,7	3,388	0,315	0,534
16,0	92,04	1,0441	613,2	3,326	0,316	0,538
20,0	113,78	1,0557	613,7	3,278	0,317	0,542
25,0	140,26	1,0705	614,5	3,230	0,318	0,546
30,0	165,97	1,0856	615,3	3,190	0,319	0,550
35,0	190,92	1,1010	616,3	3,156	0,320	0,554
40,0	215,14	1,1166	617,4	3,127	0,321	0,558
45,0	238,65	1,1325	618,6	3,100	0,322	0,561
50,0	261,46	1,1485	619,9	3,077	0,323	0,564
60,0	305,08	1,1812	622,6	3,036	0,325	0,570
70,0	346,19	1,2144	625,7	3,002	0,327	0,574
80,0	384,97	1,2481	629,0	2,972	0,328	0,578

Аргон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=900\text{ K}$						
0,1	0,53	1,0003	663,9	4,451	0,312	0,520
1,0	5,32	1,0026	664,0	3,971	0,312	0,521
2,0	10,62	1,0051	664,2	3,827	0,313	0,522
3,0	15,89	1,0077	664,3	3,742	0,313	0,523
4,0	21,14	1,0103	664,5	3,682	0,313	0,524
5,0	26,35	1,0129	664,6	3,635	0,313	0,525
6,0	31,54	1,0156	664,8	3,597	0,313	0,526
8,0	41,84	1,0208	665,2	3,536	0,314	0,527
10,0	52,03	1,0261	665,5	3,489	0,314	0,529
12,0	62,11	1,0315	665,9	3,450	0,315	0,531
16,0	81,95	1,0423	666,7	3,389	0,315	0,534
20,0	101,37	1,0532	667,6	3,342	0,316	0,537
25,0	125,07	1,0671	668,8	3,294	0,317	0,540
30,0	148,13	1,0812	670,0	3,254	0,318	0,544
35,0	170,58	1,0954	671,4	3,221	0,319	0,547
40,0	192,42	1,1098	672,8	3,192	0,320	0,550
45,0	213,68	1,1243	674,2	3,166	0,321	0,552
50,0	234,37	1,1389	675,8	3,143	0,321	0,555
60,0	274,11	1,1686	679,1	3,103	0,323	0,559
70,0	311,79	1,1986	682,6	3,069	0,325	0,563
80,0	347,55	1,2288	686,2	3,039	0,327	0,567
90,0	381,52	1,2593	690,1	3,013	0,328	0,570
$T=1000\text{ K}$						
0,1	0,48	1,0002	715,9	4,506	0,312	0,520
1,0	4,79	1,0025	716,1	4,026	0,312	0,521
5,0	23,73	1,0124	717,1	3,690	0,313	0,524
10,0	46,88	1,0249	718,3	3,545	0,314	0,527
20,0	91,48	1,0505	721,1	3,398	0,316	0,533
30,0	133,89	1,0766	724,1	3,311	0,317	0,539
40,0	174,23	1,1031	727,4	3,249	0,319	0,544
50,0	212,61	1,1299	730,9	3,201	0,320	0,548
60,0	249,15	1,1571	734,6	3,161	0,322	0,552
70,0	283,95	1,1845	738,5	3,128	0,323	0,555
80,0	317,13	1,2120	742,5	3,098	0,325	0,558
90,0	348,81	1,2397	746,7	3,072	0,326	0,561
100,0	379,06	1,2675	750,9	3,049	0,328	0,564
$T=1100\text{ K}$						
0,1	0,44	1,0002	767,9	4,555	0,312	0,520
1,0	4,36	1,0023	768,2	4,076	0,312	0,521
5,0	21,59	1,0118	769,4	3,740	0,313	0,523
10,0	42,67	1,0237	771,0	3,595	0,314	0,526
20,0	83,38	1,0477	774,3	3,449	0,315	0,531
30,0	122,22	1,0721	777,8	3,362	0,317	0,535
40,0	159,30	1,0968	781,6	3,301	0,318	0,539
50,0	194,71	1,1217	785,5	3,253	0,319	0,543
60,0	228,54	1,1467	789,5	3,214	0,321	0,546
70,0	260,90	1,1719	793,7	3,180	0,322	0,549
80,0	291,86	1,1972	798,0	3,151	0,323	0,552
90,0	321,53	1,2226	802,4	3,126	0,325	0,554
100,0	349,97	1,2481	806,9	3,103	0,326	0,556

Аргон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=1200\text{ K}$						
0,1	0,40	1,0002	820,0	4,601	0,312	0,520
1,0	4,00	1,0022	820,3	4,121	0,312	0,521
5,0	19,80	1,0112	821,7	3,786	0,313	0,523
10,0	39,16	1,0224	823,5	3,641	0,314	0,525
20,0	76,63	1,0451	827,3	3,495	0,315	0,529
30,0	112,48	1,0679	831,2	3,409	0,316	0,533
40,0	146,80	1,0910	835,3	3,348	0,317	0,536
50,0	179,69	1,1141	839,6	3,300	0,319	0,539
60,0	211,21	1,1374	843,9	3,261	0,320	0,542
70,0	241,45	1,1608	848,4	3,228	0,321	0,544
80,0	270,49	1,1842	852,9	3,199	0,322	0,547
90,0	298,39	1,2076	857,6	3,174	0,323	0,549
100,0	325,22	1,2311	862,3	3,151	0,324	0,551
120,0	375,94	1,2781	871,9	3,111	0,327	0,554
$T=1300\text{ K}$						
0,1	0,37	1,0002	872,0	4,642	0,312	0,520
1,0	3,69	1,0021	872,4	4,163	0,312	0,521
5,0	18,29	1,0106	874,0	3,827	0,313	0,522
10,0	36,19	1,0212	876,0	3,683	0,313	0,524
20,0	70,90	1,0426	880,1	3,537	0,315	0,527
30,0	104,20	1,0641	884,4	3,451	0,316	0,531
40,0	136,17	1,0857	888,8	3,391	0,317	0,533
50,0	166,88	1,1073	893,3	3,343	0,318	0,536
60,0	196,41	1,1291	897,9	3,304	0,319	0,538
70,0	224,81	1,1508	902,6	3,271	0,320	0,540
80,0	252,15	1,1726	907,4	3,243	0,321	0,542
90,0	278,49	1,1944	912,2	3,217	0,322	0,544
100,0	303,89	1,2162	917,1	3,195	0,323	0,546
120,0	352,06	1,2597	927,1	3,155	0,325	0,549
140,0	397,06	1,3032	937,2	3,122	0,327	0,552
$T=1400\text{ K}$						
0,1	0,34	1,0002	924,1	4,681	0,312	0,520
1,0	3,43	1,0020	924,4	4,202	0,312	0,521
5,0	16,99	1,0100	926,2	3,866	0,313	0,522
10,0	33,64	1,0201	928,4	3,721	0,313	0,523
20,0	65,98	1,0403	932,8	3,576	0,314	0,526
30,0	97,08	1,0605	937,4	3,491	0,315	0,529
40,0	127,01	1,0808	942,0	3,430	0,316	0,531
50,0	155,83	1,1012	946,8	3,383	0,317	0,534
60,0	183,60	1,1215	951,6	3,344	0,318	0,536
70,0	210,38	1,1419	956,5	3,311	0,319	0,537
80,0	236,22	1,1623	961,4	3,283	0,320	0,539
90,0	261,17	1,1826	966,4	3,258	0,321	0,541
100,0	285,28	1,2030	971,5	3,235	0,322	0,542
120,0	331,16	1,2436	981,7	3,196	0,324	0,545
140,0	374,18	1,2841	992,1	3,163	0,325	0,547
$T=1500\text{ K}$						
0,1	0,32	1,0002	976,1	4,717	0,312	0,520
1,0	3,20	1,0019	976,5	4,237	0,312	0,521

Аргон

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
5,0	15,86	1,0095	978,3	3,902	0,313	0,522
10,0	31,43	1,0191	980,7	3,757	0,313	0,523
20,0	61,71	1,0382	985,4	3,612	0,314	0,525
30,0	90,89	1,0573	990,2	3,527	0,315	0,528
40,0	119,03	1,0764	995,1	3,467	0,316	0,530
50,0	146,18	1,0956	1000,0	3,419	0,317	0,531
60,0	172,41	1,1147	1005,0	3,381	0,318	0,533
70,0	197,74	1,1339	1010,1	3,348	0,318	0,535
80,0	222,24	1,1530	1015,2	3,320	0,319	0,536
90,0	245,95	1,1721	1020,4	3,295	0,320	0,538
100,0	268,90	1,1912	1025,6	3,272	0,321	0,539
120,0	312,69	1,2293	1036,0	3,233	0,322	0,541
140,0	353,89	1,2672	1046,7	3,200	0,324	0,543
160,0	392,77	1,3048	1057,4	3,172	0,325	0,545

T=1750 K

0,1	0,27	1,0002	1106,2	4,797	0,312	0,520
1,0	2,74	1,0017	1106,6	4,318	0,312	0,521
5,0	13,61	1,0084	1108,7	3,982	0,313	0,521
10,0	27,00	1,0168	1111,3	3,838	0,313	0,522
20,0	53,13	1,0336	1116,5	3,693	0,314	0,524
30,0	78,42	1,0503	1121,8	3,608	0,314	0,525
40,0	102,92	1,0671	1127,1	3,548	0,315	0,527
50,0	126,67	1,0838	1132,4	3,501	0,316	0,528
60,0	149,70	1,1004	1137,8	3,463	0,316	0,529
70,0	172,05	1,1171	1143,2	3,430	0,317	0,530
80,0	193,75	1,1337	1148,6	3,402	0,317	0,531
90,0	214,83	1,1502	1154,1	3,377	0,318	0,532
100,0	235,32	1,1667	1159,5	3,355	0,319	0,533
120,0	274,64	1,1996	1170,5	3,316	0,320	0,535
140,0	311,90	1,2323	1181,6	3,284	0,321	0,537
160,0	347,30	1,2649	1192,7	3,255	0,322	0,538
180,0	380,98	1,2972	1203,8	3,230	0,323	0,539

T=2000 K

0,1	0,24	1,0001	1236,3	4,866	0,312	0,520
1,0	2,40	1,0015	1236,8	4,387	0,312	0,520
5,0	11,92	1,0075	1239,0	4,052	0,312	0,521
10,0	23,67	1,0149	1241,7	3,908	0,313	0,522
20,0	46,65	1,0299	1247,3	3,763	0,313	0,523
30,0	68,98	1,0447	1252,9	3,678	0,314	0,524
40,0	90,69	1,0596	1258,5	3,618	0,314	0,525
50,0	111,81	1,0743	1264,1	3,571	0,315	0,526
60,0	132,35	1,0891	1269,7	3,533	0,315	0,527
70,0	152,35	1,1038	1275,4	3,501	0,316	0,527
80,0	171,84	1,1184	1281,0	3,473	0,316	0,528
90,0	190,82	1,1330	1286,7	3,448	0,317	0,529
100,0	209,34	1,1476	1292,4	3,426	0,317	0,530
120,0	245,02	1,1766	1303,7	3,387	0,318	0,531
140,0	279,03	1,2054	1315,1	3,355	0,319	0,532
160,0	311,50	1,2340	1326,5	3,327	0,320	0,533
180,0	342,55	1,2624	1337,9	3,302	0,321	0,534
200,0	372,29	1,2906	1349,3	3,280	0,322	0,535

Аргон

p	ρ	z	h	s	c_p	c_p
$T=2250\text{ K}$						
0,1	0,21	1,0001	1366,3	4,928	0,312	0,520
1,0	2,13	1,0013	1366,9	4,448	0,312	0,520
5,0	10,61	1,0067	1369,2	4,113	0,312	0,521
10,0	21,07	1,0143	1372,1	3,969	0,313	0,521
20,0	41,59	1,0268	1377,9	3,825	0,313	0,522
30,0	61,59	1,0402	1383,7	3,740	0,313	0,523
40,0	81,08	1,0535	1389,5	3,680	0,314	0,523
50,0	100,09	1,0667	1395,3	3,633	0,314	0,524
60,0	118,64	1,0799	1401,1	3,595	0,315	0,525
70,0	136,75	1,0931	1406,9	3,563	0,315	0,525
80,0	154,44	1,1062	1412,8	3,535	0,315	0,526
90,0	171,71	1,1192	1418,6	3,510	0,316	0,527
100,0	188,60	1,1322	1424,4	3,488	0,316	0,527
120,0	221,26	1,1581	1436,1	3,450	0,317	0,528
140,0	252,53	1,1838	1447,7	3,417	0,318	0,529
160,0	282,51	1,2094	1459,3	3,389	0,318	0,530
180,0	311,30	1,2347	1470,9	3,365	0,319	0,530
200,0	338,98	1,2599	1482,5	3,342	0,320	0,531
220,0	365,62	1,2849	1494,1	3,322	0,320	0,532
240,0	391,30	1,3097	1505,6	3,304	0,321	0,532
$T=2500\text{ K}$						
0,1	0,19	1,0001	1496,4	4,983	0,312	0,520
1,0	1,92	1,0012	1497,0	4,503	0,312	0,520
5,0	9,55	1,0061	1499,4	4,168	0,312	0,521
10,0	18,99	1,0122	1502,3	4,024	0,313	0,521
20,0	37,53	1,0243	1508,3	3,880	0,313	0,522
30,0	55,63	1,0364	1514,3	3,795	0,313	0,522
40,0	73,32	1,0484	1520,2	3,735	0,313	0,523
50,0	90,62	1,0604	1526,2	3,688	0,314	0,523
60,0	107,53	1,0724	1532,2	3,650	0,314	0,524
70,0	124,08	1,0843	1538,1	3,618	0,314	0,524
80,0	140,27	1,0961	1544,1	3,590	0,315	0,524
90,0	156,12	1,1079	1550,0	3,566	0,315	0,525
100,0	171,64	1,1197	1555,9	3,544	0,315	0,525
120,0	201,76	1,1431	1567,8	3,505	0,316	0,526
140,0	230,69	1,1663	1579,6	3,473	0,316	0,527
160,0	258,54	1,1894	1591,5	3,445	0,317	0,527
180,0	285,36	1,2123	1603,2	3,420	0,318	0,528
200,0	311,23	1,2350	1615,0	3,398	0,318	0,529
220,0	336,21	1,2576	1626,7	3,378	0,319	0,529
240,0	360,34	1,2800	1638,4	3,360	0,319	0,530
260,0	383,69	1,3023	1650,0	3,343	0,320	0,530
$T=2750\text{ K}$						
0,1	0,17	1,0001	1626,5	5,032	0,312	0,520
1,0	1,75	1,0011	1627,1	4,553	0,312	0,520
5,0	8,69	1,0056	1629,5	4,218	0,312	0,521
10,0	17,28	1,0111	1632,6	4,074	0,312	0,521
20,0	34,18	1,0222	1638,6	3,929	0,313	0,521
30,0	50,73	1,0332	1644,7	3,845	0,313	0,522
40,0	66,93	1,0442	1650,8	3,785	0,313	0,522

Аргон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
50,0	82,79	1,0552	1656,9	3,738	0,313	0,522
60,0	98,33	1,0661	1662,9	3,700	0,314	0,523
70,0	113,57	1,0769	1669,0	3,668	0,314	0,523
80,0	128,50	1,0877	1675,0	3,640	0,314	0,523
90,0	143,14	1,0985	1681,1	3,616	0,314	0,524
100,0	157,51	1,1092	1687,1	3,594	0,315	0,524
120,0	185,44	1,1306	1699,1	3,555	0,315	0,525
140,0	212,37	1,1518	1711,1	3,523	0,316	0,525
160,0	238,36	1,1728	1723,1	3,495	0,316	0,526
180,0	263,46	1,1937	1735,0	3,471	0,317	0,526
200,0	287,74	1,2144	1746,9	3,448	0,317	0,527
220,0	311,23	1,2350	1758,7	3,428	0,317	0,527
240,0	333,99	1,2555	1770,5	3,410	0,318	0,527
260,0	356,06	1,2758	1782,2	3,393	0,318	0,528
280,0	377,48	1,2960	1793,9	3,378	0,319	0,528
300,0	398,28	1,3160	1805,6	3,363	0,319	0,528

$T=3000\text{ K}$

0,1	0,16	1,0001	1756,6	5,077	0,312	0,520
1,0	1,60	1,0010	1757,1	4,598	0,312	0,520
5,0	7,97	1,0051	1759,6	4,263	0,312	0,520
10,0	15,85	1,0102	1762,7	4,119	0,312	0,521
20,0	31,39	1,0204	1768,9	3,975	0,313	0,521
30,0	46,62	1,0306	1775,1	3,890	0,313	0,521
40,0	61,56	1,0407	1781,3	3,830	0,313	0,522
50,0	76,21	1,0507	1787,4	3,784	0,313	0,522
60,0	90,59	1,0607	1793,6	3,746	0,313	0,522
70,0	104,71	1,0707	1799,7	3,714	0,314	0,522
80,0	118,56	1,0807	1805,8	3,686	0,314	0,523
90,0	132,17	1,0906	1811,9	3,661	0,314	0,523
100,0	145,54	1,1004	1818,0	3,639	0,314	0,523
120,0	171,59	1,1200	1830,2	3,601	0,315	0,524
140,0	196,77	1,1395	1842,3	3,569	0,315	0,524
160,0	221,13	1,1588	1854,3	3,541	0,315	0,524
180,0	244,71	1,1780	1866,4	3,516	0,316	0,525
200,0	267,57	1,1971	1878,3	3,494	0,316	0,525
220,0	289,75	1,2160	1890,2	3,474	0,317	0,526
240,0	311,28	1,2348	1902,1	3,456	0,317	0,526
260,0	332,19	1,2535	1913,9	3,439	0,317	0,526
280,0	352,52	1,2721	1925,7	3,424	0,318	0,526
300,0	372,30	1,2905	1937,5	3,409	0,318	0,527

Таблица 2.3. Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=500\text{ K}$						
0,1	416,6	1,67	1,001	348,6	27,2	0,667
1,0	418,3	1,68	1,005	349,5	27,4	0,668
2,0	420,1	1,69	1,010	350,6	27,6	0,670
3,0	422,0	1,70	1,015	351,7	27,8	0,672

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
4,0	423,9	1,71	1,020	352,9	28,0	0,674
5,0	425,9	1,73	1,024	354,1	28,2	0,675
6,0	427,8	1,74	1,028	355,3	28,4	0,677
8,0	431,9	1,76	1,036	357,8	28,8	0,680
10,0	436,2	1,79	1,042	360,5	29,2	0,683
12,0	440,6	1,82	1,047	363,3	29,6	0,685
16,0	449,7	1,87	1,054	369,3	30,5	0,690
20,0	459,3	1,93	1,057	375,7	31,4	0,694
25,0	471,9	2,01	1,056	384,2	32,6	0,698
30,0	485,0	2,08	1,050	393,1	33,8	0,701
35,0	498,5	2,16	1,040	402,3	35,0	0,703
40,0	512,4	2,24	1,026	411,8	36,2	0,705
45,0	526,4	2,32	1,011	421,4	37,4	0,706
$T = 600 \text{ K}$						
0,1	456,4	1,67	1,000	396,4	31,0	0,667
1,0	458,1	1,68	1,002	397,2	31,1	0,667
2,0	460,0	1,69	1,004	398,0	31,3	0,668
3,0	461,9	1,70	1,006	398,9	31,4	0,669
4,0	463,8	1,71	1,008	399,7	31,6	0,670
5,0	465,7	1,72	1,010	400,7	31,8	0,671
6,0	467,7	1,73	1,011	401,6	31,9	0,671
8,0	471,7	1,75	1,014	403,5	32,3	0,672
10,0	475,8	1,77	1,015	405,6	32,6	0,674
12,0	480,0	1,79	1,017	407,7	33,0	0,675
16,0	488,5	1,83	1,017	412,2	33,7	0,677
20,0	497,3	1,87	1,016	417,0	34,4	0,678
25,0	508,5	1,93	1,012	423,3	35,4	0,680
30,0	520,1	1,99	1,005	430,0	36,4	0,681
35,0	531,9	2,04	0,996	436,9	37,3	0,681
40,0	543,9	2,10	0,985	444,1	38,3	0,681
45,0	556,1	2,16	0,973	451,5	39,3	0,681
50,0	568,3	2,22	0,960	458,9	40,3	0,681
60,0	592,9	2,33	0,932	474,1	42,2	0,680
$T = 700 \text{ K}$						
0,1	493,0	1,67	1,000	440,8	34,4	0,667
1,0	494,6	1,67	1,001	441,4	34,5	0,667
2,0	496,5	1,68	1,001	442,1	34,7	0,667
3,0	498,4	1,69	1,002	442,8	34,8	0,668
4,0	500,3	1,70	1,002	443,5	35,0	0,668
5,0	502,2	1,71	1,002	444,2	35,1	0,668
6,0	504,1	1,72	1,002	444,9	35,3	0,668
8,0	507,9	1,73	1,002	446,5	35,6	0,669
10,0	511,9	1,75	1,002	448,1	35,9	0,669
12,0	515,8	1,77	1,001	449,7	36,2	0,670
16,0	523,8	1,80	0,999	453,3	36,8	0,670
20,0	532,0	1,84	0,995	457,0	37,4	0,670
25,0	542,4	1,88	0,989	462,0	38,2	0,671
30,0	553,0	1,93	0,982	467,2	39,0	0,670
35,0	563,7	1,97	0,973	472,7	39,8	0,670
40,0	574,5	2,02	0,963	478,4	40,7	0,670
45,0	585,4	2,06	0,953	484,2	41,5	0,669
50,0	596,3	2,11	0,942	490,2	42,3	0,668

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
60,0	618,3	2,20	0,919	502,4	44,0	0,667
70,0	640,2	2,28	0,894	515,0	45,6	0,665
$T=800\text{ K}$						
0,1	527,0	1,67	1,000	482,6	37,7	0,667
1,0	528,6	1,67	1,000	483,1	37,8	0,667
2,0	530,4	1,68	0,999	483,6	37,9	0,667
3,0	532,2	1,69	0,999	484,2	38,0	0,667
4,0	534,1	1,70	0,999	484,8	38,2	0,667
5,0	535,9	1,70	0,998	485,3	38,3	0,667
6,0	537,8	1,71	0,997	485,9	38,4	0,667
8,0	541,5	1,72	0,996	487,2	38,7	0,667
10,0	545,2	1,74	0,994	488,5	39,0	0,667
12,0	549,0	1,75	0,993	489,8	39,2	0,667
16,0	556,6	1,78	0,989	492,6	39,8	0,666
20,0	564,3	1,81	0,984	495,6	40,3	0,666
25,0	574,1	1,85	0,977	499,6	41,0	0,665
30,0	583,9	1,89	0,969	503,9	41,7	0,665
35,0	593,8	1,92	0,960	508,3	42,4	0,664
40,0	603,7	1,96	0,951	512,9	43,1	0,663
45,0	613,7	2,00	0,942	517,7	43,9	0,662
50,0	623,7	2,03	0,932	522,5	44,6	0,661
60,0	643,8	2,11	0,911	532,7	46,0	0,659
70,0	663,8	2,18	0,890	543,1	47,5	0,657
80,0	683,7	2,25	0,868	553,7	48,9	0,655
$T=900\text{ K}$						
0,1	558,9	1,67	1,000	522,3	40,8	0,667
1,0	560,5	1,67	0,999	522,7	40,9	0,667
2,0	562,3	1,68	0,998	523,1	41,0	0,666
3,0	564,0	1,69	0,997	523,6	41,1	0,666
4,0	565,8	1,69	0,997	524,0	41,2	0,666
5,0	567,6	1,70	0,996	524,5	41,3	0,666
6,0	569,4	1,70	0,995	525,0	41,4	0,666
8,0	572,9	1,72	0,992	526,0	41,7	0,666
10,0	576,5	1,73	0,990	527,0	41,9	0,665
12,0	580,1	1,74	0,988	528,1	42,2	0,665
16,0	587,4	1,77	0,983	530,4	42,6	0,664
20,0	594,7	1,79	0,977	532,9	43,1	0,663
25,0	603,9	1,82	0,970	536,1	43,7	0,662
30,0	613,1	1,86	0,962	539,6	44,4	0,661
35,0	622,4	1,89	0,953	543,3	45,0	0,660
40,0	631,7	1,92	0,944	547,1	45,6	0,659
45,0	641,0	1,95	0,935	551,0	46,3	0,658
50,0	650,3	1,98	0,926	555,1	46,9	0,656
60,0	669,0	2,04	0,907	563,6	48,2	0,654
70,0	687,5	2,11	0,888	572,4	49,5	0,652
80,0	706,0	2,17	0,869	581,4	50,8	0,649
90,0	724,3	2,22	0,850	590,6	52,0	0,647
$T=900\text{ K}$						
0,1	589,1	1,67	1,000	560,2	43,7	0,667
1,0	590,7	1,67	0,999	560,5	43,8	0,666
5,0	597,5	1,69	0,994	562,0	44,2	0,666
10,0	606,1	1,72	0,988	564,1	44,8	0,664

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	623,5	1,78	0,973	568,9	45,9	0,662
30,0	641,0	1,83	0,958	574,5	47,0	0,659
40,0	658,5	1,89	0,941	580,7	48,1	0,656
50,0	676,1	1,94	0,923	587,4	49,3	0,653
60,0	693,6	2,00	0,906	594,6	50,4	0,651
70,0	711,0	2,05	0,888	602,1	51,6	0,648
80,0	728,3	2,10	0,870	609,9	52,7	0,646
90,0	745,5	2,15	0,853	617,8	53,9	0,643
100,0	762,5	2,20	0,836	626,0	55,0	0,641

$T=1100\text{ K}$

0,1	617,9	1,67	1,000	596,6	46,6	0,667
1,0	619,4	1,67	0,999	596,9	46,7	0,666
5,0	626,0	1,69	0,993	598,1	47,0	0,665
10,0	634,3	1,72	0,986	599,8	47,5	0,664
20,0	650,9	1,77	0,971	603,8	48,5	0,661
30,0	667,6	1,82	0,956	608,4	49,5	0,658
40,0	684,3	1,86	0,939	613,7	50,6	0,654
50,0	700,9	1,91	0,923	619,4	51,6	0,652
60,0	717,5	1,96	0,906	625,5	52,7	0,649
70,0	734,0	2,01	0,889	631,9	53,7	0,646
80,0	750,4	2,05	0,873	638,6	54,8	0,643
90,0	766,7	2,10	0,856	645,6	55,8	0,641
100,0	782,8	2,14	0,840	652,7	56,9	0,638

$T=1200\text{ K}$

0,1	645,3	1,67	1,000	631,8	49,3	0,667
1,0	646,8	1,67	0,999	632,0	49,4	0,666
5,0	653,2	1,69	0,993	633,0	49,7	0,665
10,0	661,2	1,71	0,986	634,4	50,2	0,663
20,0	677,2	1,76	0,970	637,7	51,1	0,660
30,0	693,2	1,80	0,955	641,6	52,1	0,657
40,0	709,1	1,85	0,939	646,0	53,0	0,653
50,0	725,0	1,89	0,923	650,9	54,0	0,650
60,0	740,9	1,93	0,907	656,1	54,9	0,647
70,0	756,6	1,97	0,891	661,7	55,9	0,644
80,0	772,2	2,02	0,876	667,5	56,9	0,642
90,0	787,7	2,06	0,860	673,6	57,8	0,639
100,0	803,0	2,10	0,845	679,8	58,8	0,637
120,0	833,3	2,18	0,816	692,7	60,7	0,632

$T=1300\text{ K}$

0,1	671,7	1,67	1,000	665,8	52,0	0,667
1,0	673,1	1,67	0,999	666,0	52,0	0,666
5,0	679,3	1,69	0,993	666,8	52,4	0,665
10,0	687,0	1,71	0,985	667,9	52,8	0,663
20,0	702,4	1,75	0,970	670,6	53,6	0,659
30,0	717,8	1,79	0,955	673,9	54,5	0,656
40,0	733,1	1,83	0,939	677,7	55,4	0,653
50,0	748,4	1,87	0,924	681,9	56,3	0,649
60,0	763,6	1,91	0,909	686,4	57,2	0,646
70,0	778,6	1,95	0,894	691,2	58,1	0,643
80,0	793,6	1,98	0,879	696,3	59,0	0,641
90,0	808,4	2,02	0,864	701,6	59,9	0,638

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
100,0	823,1	2,06	0,850	707,1	60,8	0,635
120,0	852,1	2,13	0,823	718,6	62,5	0,631
140,0	880,5	2,20	0,797	730,5	64,3	0,627

$T=1400$ K

0,1	697,0	1,67	1,000	698,9	54,6	0,667
1,0	698,4	1,67	0,999	699,0	54,6	0,666
5,0	704,4	1,69	0,993	699,6	54,9	0,665
10,0	711,8	1,70	0,985	700,5	55,3	0,663
20,0	726,8	1,74	0,970	702,8	56,1	0,659
30,0	741,6	1,78	0,955	705,6	56,9	0,656
40,0	756,4	1,82	0,940	708,8	57,7	0,652
50,0	771,1	1,85	0,925	712,3	58,6	0,649
60,0	785,7	1,89	0,911	716,3	59,4	0,646
70,0	800,2	1,92	0,896	720,5	60,2	0,643
80,0	814,6	1,96	0,882	724,9	61,1	0,640
90,0	828,8	1,99	0,869	729,6	61,9	0,637
100,0	842,9	2,03	0,855	734,5	62,7	0,635
120,0	870,8	2,09	0,829	744,7	64,4	0,630
140,0	898,2	2,16	0,804	755,4	66,1	0,625

$T=1500$ K

0,1	721,5	1,67	1,000	731,0	57,1	0,667
1,0	722,8	1,67	0,999	731,1	57,1	0,666
5,0	728,6	1,68	0,993	731,6	57,4	0,665
10,0	735,9	1,70	0,985	732,3	57,8	0,663
20,0	750,3	1,74	0,971	734,2	58,5	0,659
30,0	764,7	1,77	0,956	736,5	59,3	0,656
40,0	779,0	1,81	0,942	739,3	60,0	0,652
50,0	793,2	1,84	0,927	742,3	60,8	0,649
60,0	807,2	1,87	0,913	745,7	61,6	0,646
70,0	821,2	1,91	0,899	749,4	62,4	0,643
80,0	835,1	1,94	0,886	753,3	63,2	0,640
90,0	848,9	1,97	0,873	757,4	64,0	0,637
100,0	862,5	2,00	0,860	761,7	64,7	0,634
120,0	889,4	2,06	0,835	770,9	66,3	0,629
140,0	915,8	2,12	0,811	780,5	67,9	0,625
160,0	941,7	2,18	0,789	790,5	69,4	0,621

$T=1750$ K

0,1	779,3	1,67	1,000	808,0	63,1	0,667
1,0	780,5	1,67	0,999	808,1	63,1	0,666
5,0	785,9	1,68	0,993	808,3	63,4	0,665
10,0	792,7	1,70	0,986	808,7	63,7	0,663
20,0	806,1	1,73	0,972	809,8	64,3	0,659
30,0	819,4	1,76	0,959	811,3	65,0	0,656
40,0	832,7	1,78	0,945	813,1	65,7	0,652
50,0	845,8	1,81	0,932	815,2	66,3	0,649
60,0	858,3	1,84	0,919	817,6	67,0	0,646
70,0	871,8	1,87	0,907	820,2	67,7	0,643
80,0	884,7	1,90	0,895	823,1	68,4	0,640
90,0	897,4	1,92	0,883	826,1	69,0	0,637
100,0	910,0	1,95	0,871	829,4	69,7	0,634
120,0	935,0	2,00	0,849	836,3	71,1	0,629

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
140,0	959,4	2,05	0,827	843,7	72,5	0,625
160,0	983,5	2,10	0,807	851,6	73,8	0,621
180,0	1007,1	2,15	0,788	859,8	75,2	0,617

$T=2000\text{ K}$

0,1	833,1	1,67	1,000	881,0	68,8	0,667
1,0	834,2	1,67	0,999	881,0	68,8	0,666
5,0	839,3	1,68	0,993	881,1	69,0	0,665
10,0	845,6	1,69	0,987	881,3	69,3	0,663
20,0	858,2	1,72	0,974	881,9	69,9	0,660
30,0	870,7	1,74	0,961	882,8	70,5	0,656
40,0	883,2	1,77	0,949	884,0	71,0	0,653
50,0	895,5	1,79	0,937	885,4	71,6	0,650
60,0	907,7	1,82	0,925	887,1	72,2	0,647
70,0	919,8	1,84	0,914	888,9	72,8	0,644
80,0	931,8	1,87	0,903	891,0	73,4	0,641
90,0	943,8	1,89	0,892	893,3	74,0	0,638
100,0	955,6	1,91	0,881	895,7	74,6	0,635
120,0	979,0	1,96	0,861	901,0	75,9	0,631
140,0	1001,9	2,00	0,841	906,8	77,1	0,626
160,0	1024,6	2,04	0,822	913,0	78,3	0,622
180,0	1046,8	2,09	0,805	919,5	79,5	0,618
200,0	1068,7	2,13	0,788	926,4	80,7	0,614

$T=2250\text{ K}$

0,1	883,6	1,67	1,000	950,7	74,2	0,667
1,0	884,7	1,67	0,999	950,7	74,3	0,666
5,0	889,5	1,68	0,994	950,7	74,5	0,665
10,0	895,4	1,69	0,988	950,7	74,7	0,663
20,0	907,4	1,71	0,976	950,9	75,2	0,660
30,0	919,2	1,73	0,964	951,4	75,7	0,657
40,0	930,9	1,76	0,953	952,1	76,3	0,654
50,0	942,5	1,78	0,942	953,1	76,8	0,651
60,0	954,0	1,80	0,931	954,2	77,3	0,648
70,0	965,5	1,82	0,920	955,6	77,8	0,645
80,0	976,8	1,84	0,910	957,1	78,4	0,642
90,0	988,1	1,86	0,900	958,7	78,9	0,640
100,0	999,3	1,88	0,890	960,6	79,5	0,637
120,0	1021,4	1,92	0,871	964,6	80,6	0,632
140,0	1043,1	1,96	0,853	969,1	81,7	0,628
160,0	1064,6	2,00	0,836	974,1	82,8	0,624
180,0	1085,7	2,04	0,819	979,4	83,8	0,620
200,0	1106,4	2,07	0,804	985,0	84,9	0,616
220,0	1126,9	2,11	0,789	990,8	86,0	0,613
240,0	1147,0	2,15	0,774	996,9	87,1	0,609

$T=2500\text{ K}$

0,1	931,4	1,67	1,000	1017,7	79,4	0,667
1,0	932,4	1,67	0,999	1017,6	79,5	0,666
5,0	936,9	1,68	0,994	1017,5	79,7	0,665
10,0	942,6	1,69	0,989	1017,4	79,9	0,663
20,0	953,9	1,71	0,978	1017,4	80,3	0,660
30,0	965,1	1,73	0,967	1017,5	80,8	0,657
40,0	976,3	1,75	0,956	1017,9	81,3	0,654

Аргон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
50,0	987,3	1,77	0,946	1018,5	81,8	0,652
60,0	998,3	1,79	0,936	1019,3	82,2	0,649
70,0	1009,2	1,81	0,926	1020,2	82,7	0,646
80,0	1020,0	1,82	0,917	1021,3	83,2	0,644
90,0	1030,7	1,84	0,907	1022,5	83,7	0,641
100,0	1041,3	1,86	0,898	1023,9	84,2	0,639
120,0	1062,3	1,90	0,880	1027,0	85,2	0,634
140,0	1083,1	1,93	0,864	1030,5	86,2	0,630
160,0	1103,5	1,97	0,848	1034,4	87,2	0,626
180,0	1123,6	2,00	0,832	1038,7	88,2	0,622
200,0	1143,4	2,03	0,817	1043,3	89,2	0,618
220,0	1163,0	2,07	0,803	1048,1	90,2	0,615
240,0	1182,2	2,10	0,790	1053,2	91,2	0,612
260,0	1201,3	2,13	0,777	1058,5	92,2	0,609

$T=2750$ K

0,1	976,8	1,67	1,000	1082,2	84,5	0,667
1,0	977,8	1,67	0,999	1082,2	84,5	0,666
5,0	982,1	1,68	0,995	1082,0	84,7	0,665
10,0	987,6	1,69	0,989	1081,8	84,9	0,664
20,0	998,3	1,70	0,979	1081,5	85,3	0,661
30,0	1009,0	1,72	0,969	1081,5	85,7	0,658
40,0	1019,7	1,74	0,959	1081,6	86,2	0,655
50,0	1030,2	1,76	0,950	1081,9	86,6	0,653
60,0	1040,7	1,77	0,940	1082,4	87,0	0,650
70,0	1051,1	1,79	0,931	1083,0	87,5	0,648
80,0	1061,4	1,81	0,922	1083,8	87,9	0,645
90,0	1071,6	1,83	0,914	1084,7	88,4	0,643
100,0	1081,8	1,84	0,905	1085,7	88,8	0,640
120,0	1101,9	1,88	0,889	1088,0	89,8	0,636
140,0	1121,7	1,91	0,873	1090,8	90,7	0,632
160,0	1141,3	1,94	0,858	1093,9	91,6	0,628
180,0	1160,6	1,97	0,843	1097,4	92,5	0,624
200,0	1179,6	2,00	0,830	1101,1	93,4	0,621
220,0	1198,4	2,03	0,816	1105,1	94,3	0,617
240,0	1216,9	2,06	0,804	1109,4	95,3	0,614
260,0	1235,1	2,09	0,791	1113,8	96,2	0,611
280,0	1253,2	2,12	0,779	1118,4	97,1	0,608
300,0	1271,0	2,14	0,768	1123,2	98,0	0,606

$T=3000$ K

0,1	1020,2	1,67	1,000	1144,7	89,3	0,667
1,0	1021,2	1,67	0,999	1144,6	89,4	0,666
5,0	1025,3	1,68	0,995	1144,4	89,5	0,665
10,0	1030,5	1,68	0,990	1144,1	89,7	0,664
20,0	1040,8	1,70	0,981	1143,7	90,1	0,661
30,0	1051,1	1,72	0,971	1143,5	90,5	0,659
40,0	1061,3	1,73	0,962	1143,5	90,9	0,656
50,0	1071,4	1,75	0,953	1143,6	91,3	0,654
60,0	1081,4	1,77	0,944	1143,8	91,7	0,651
70,0	1091,4	1,78	0,936	1144,2	92,1	0,649
80,0	1101,3	1,80	0,928	1144,7	92,5	0,646
90,0	1111,1	1,81	0,919	1145,3	93,0	0,644
100,0	1120,8	1,83	0,911	1146,0	93,4	0,642

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
120,0	1140,2	1,86	0,896	1147,8	94,2	0,638
140,0	1159,2	1,89	0,881	1149,9	95,1	0,634
160,0	1178,0	1,92	0,867	1152,4	95,9	0,630
180,0	1196,6	1,95	0,853	1155,2	96,8	0,627
200,0	1214,9	1,97	0,840	1158,3	97,6	0,623
220,0	1233,0	2,00	0,828	1161,6	98,5	0,620
240,0	1250,8	2,03	0,816	1165,1	99,3	0,617
260,0	1268,5	2,06	0,804	1168,9	100,2	0,614
280,0	1285,9	2,08	0,793	1172,8	101,0	0,611
300,0	1303,1	2,11	0,782	1176,9	101,9	0,608

2.2. Криптон

В табл. 2.4 приводятся основные работы, в которых исследована сжимаемость криптона.

Таблица 2.4. Экспериментальные исследования плотности криптона в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Автор	Литературный источник
273,15—573,15	20—40	Битти, Брайерли, Барриалт (1952)	[38]
273,15—873,15	1—8	Валлей, Шнейдер (1954)	[39]
273,15—423,15	1,8—303,3	Траппеньерс, Вассенаар, Уолкерс (1966)	[40]
293,15—738,15	5—41	Рабинович, Токина, Березин (1970)	[33]

Довольно обширную область по температуре охватывают данные о сжимаемости газообразного криптона, полученные в [39]. Сжимаемость измерена методом Барнетта. Работа проведена тщательно, большое внимание уделено чистоте исследуемого вещества.

Траппеньерс с сотрудниками [40] представили сжимаемость криптона в газообразном состоянии в широкой области давлений. Опытные данные, отличающиеся высокой точностью, представлены на семи изотермах с интервалом $\Delta T = 25$ К.

Данные работы [38], по-видимому, не являются высокоточными из-за недостаточной чистоты исследуемого вещества.

В работе [33] плотность криптона в газообразном состоянии измерена относительным методом. Погрешность экспериментальных данных авторы оценивают в 0,12%.

Предварительная обработка по уравнению (1.3) показала, что при использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6) достаточно точное описание экспериментальных данных получается в области температур выше 373,15 К.

На рис. 2.3 представлены области экспериментального исследования удельного объема криптона; заштрихована область параметров состояния экспериментальных данных, заложенная в программу получения уравнения состояния.

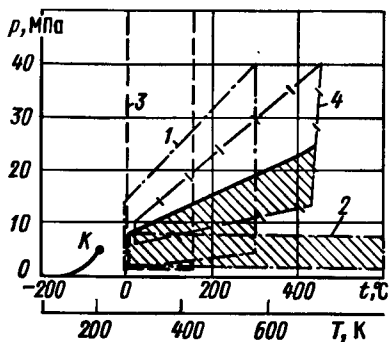


Рис. 2.3

Рис. 2.3. Область обработки данных о сжимаемости газообразного криптона: 1 — [38]; 2 — [39]; 3 — [40]; 4 — [33]

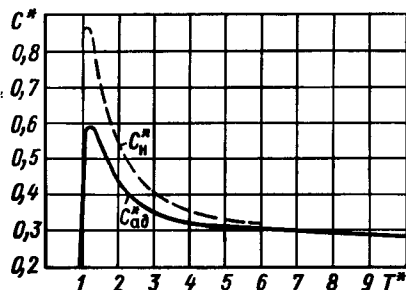


Рис. 2.4

Рис. 2.4. Неаддитивный третий вириальный коэффициент криптона C_n^*

Для получения уравнения состояния криптона использовано 88 экспериментальных точек: 17 точек из работы [39]; 25 точек, полученных в работе [40]; 27 точек из работы [38] и 19 точек из работы [33].

В результате обработки отобранных экспериментальных данных найдены значения параметров потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для криптона: $b_0 = 0,664196965 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $\epsilon/k = 164,990642 \text{ К}$.

Уравнение состояния описывает экспериментальные данные о факторе сжимаемости криптона со средней квадратической погрешностью 0,11%, причем данные Битти описываются с погрешностью 0,11, данные Рабиновича — 0,15, Валлея — 0,13 и Траппенберга — 0,08%.

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для приведенных вириальных коэффициентов B^* , D^* и E^* использованы те же, что и при получении уравнения состояния аргона (см. § 2.1).

Введена поправка на неаддитивность в третий вириальный коэффициент. Неаддитивный третий вириальный коэффициент криптона представлен на рис. 2.4. Рассчитанные значения неаддитивного третьего вириального коэффициента аппроксимированы полиномом вида (2.2). Константы аппроксимации имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1,67850533 \cdot 10^{-1} & c_3 &= 1,22120361 \cdot 10^2 \\ c_1 &= 1,95035473 \cdot 10^0 & c_6 &= -1,04612408 \cdot 10^2 \\ c_2 &= -1,13655092 \cdot 10^1 & c_7 &= 5,01737361 \cdot 10^1 \\ c_3 &= 4,23561349 \cdot 10^1 & c_8 &= -1,04183061 \cdot 10^1 \\ c_4 &= -8,95529206 \cdot 10^1 & & \end{aligned}$$

Для получения единых констант модельного потенциала Леннарда-Джонса (12-6) применен метод переаппроксимации (§ 1.5). В обработку включены: представленное выше теоретически обоснованное уравнение состояния криптона, эмпирическое уравнение состояния из работы [41], уравнения вязкости и теплопроводности криптона при атмосферном давлении из работы [34] и уравнения вязкости и теплопроводности при повышенном давлении из [41].

При обработке указанных данных использованы константы аппроксимации для соотношения $f_2/\Omega^{(2,2)*}$ и вириальных коэффициентов B'_i , C'_i и B''_i , C''_i , приведенные в § 2.1.

Средняя квадратическая погрешность аппроксимации данных, %: $\delta z = 0,316$; $\delta \eta_0 = 2,289$; $\delta \eta = 2,680$; $\delta \lambda_0 = 2,289$; $\delta \lambda = 1,898$.

Для расчета таблиц термодинамических свойств криптона получены выражения, описывающие идеально-газовые функции.

Для криптона, так же как и для аргона, теплоемкость $c_p^0 = \text{const}$ в широкой области температур; тогда $c_p^0/R = 2,5$.

За начало отсчета энтальпии принимается состояние кристалла при 0 К. Теплота сублимации при 0 К принята по данным [37], $\Delta h_0^0 = 1,33556 \cdot 10^5$ Дж/кг. В программе расчета термодинамических свойств используется комплекс

$$\frac{h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0}{RT} = \frac{h^0 - h_0^0}{RT} + \frac{\Delta h_0^0}{RT} = 2,5 + \frac{\Delta h_0^0}{1000R} \frac{1000}{T} = 2,5 + \frac{\Delta h_0^0}{1000R} \tau, \quad (2.15)$$

где $\tau = 1000/T$.

Таким образом, для идеально-газовых функций криптона справедливы следующие значения до 5000 К:

$$c_p^0/R = 2,5; \quad \frac{h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0}{RT} = 2,5 + 1,346106\tau. \quad (2.16)$$

Значения энтропии криптона в идеально-газовом состоянии приведены в [42] от 293,15 К. Поэтому за базовую точку отсчета энтропии принята $T = 293,15$ К, и для расчета величины s^0/R получено выражение

$$\frac{s^0}{R} = \frac{s_{293,15}^0}{R} + \int_{293,15}^T \frac{c_p^0 dT}{RT} = \left(\frac{s^0}{R} \right)_{293,15} + \frac{c_p^0}{R} \ln \frac{T}{293,15} \quad (2.17)$$

или с учетом значений констант

$$s^0/R = 19,67925 + 2,5 \ln(T/293,15). \quad (2.18)$$

Кроме того, зависимость s^0/R от температуры аппроксимирована полиномом вида (2.14). Коэффициенты полинома имеют следующие значения:

$$\begin{array}{ll} \gamma_0 = 2,91874346 \cdot 10^1 & \gamma_4 = 1,8113291 \cdot 10^1 \\ \gamma_1 = -1,66239862 \cdot 10^1 & \gamma_5 = -4,12557081 \cdot 10^0 \\ \gamma_2 = 2,20977798 \cdot 10^1 & \gamma_6 = 7,85353129 \cdot 10^{-1} \\ \gamma_3 = -2,03222780 \cdot 10^1 & \gamma_7 = -6,22193097 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

С помощью теоретически обоснованных уравнений для криптона рассчитаны таблицы теплофизических свойств. При этом использованы единичные константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6). Константы аппроксимации вириальных коэффициентов, интеграла столкновений, а также вязкостных и теплопроводностных вириальных коэффициентов взяты из § 2.1. Константы аппроксимации приведенного неаддитивного третьего вириального коэффициента индивидуальны и приведены выше в настоящем параграфе.

Значения основных величин, используемые при расчете таблиц теплофизических свойств криптона:

масса моля $\mu = 83,80$ г/моль;

газовая постоянная $R = 99,218$ Дж/(кг·К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 1,33556 \cdot 10^5$ Дж/кг;

единичные константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = 167,3465$ К;

$b_0 = 0,6862037 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Рассчитанные значения теплофизических свойств криптона приведены в табл. 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5 Криптон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=500\text{ К}$						
0,1	2,02	0,9998	391,1	2,086	0,149	0,248
1,0	20,19	0,9984	390,4	1,856	0,149	0,251
2,0	40,44	0,9970	389,7	1,786	0,150	0,254
3,0	60,73	0,9957	388,9	1,745	0,150	0,257
4,0	81,07	0,9946	388,2	1,715	0,150	0,260
5,0	101,43	0,9937	387,5	1,692	0,151	0,263
6,0	121,81	0,9929	386,6	1,672	0,151	0,266
8,0	162,59	0,9919	385,5	1,641	0,152	0,273
10,0	203,31	0,9915	384,1	1,617	0,153	0,279
12,0	243,88	0,9919	382,9	1,596	0,153	0,284
16,0	324,23	0,9947	380,5	1,563	0,155	0,296
20,0	402,96	1,0005	378,3	1,537	0,156	0,306
25,0	498,20	1,0116	375,9	1,509	0,157	0,317
30,0	589,08	1,0266	373,9	1,487	0,158	0,326
$T=600\text{ К}$						
0,1	1,68	1,0000	415,9	2,131	0,149	0,248
1,0	16,79	1,0005	415,4	1,902	0,149	0,250
2,0	33,56	1,0011	415,0	1,833	0,149	0,252
3,0	50,31	1,0017	414,5	1,791	0,150	0,254
4,0	67,02	1,0025	414,0	1,762	0,150	0,256
5,0	83,71	1,0034	413,5	1,739	0,150	0,258
6,0	100,35	1,0044	413,1	1,720	0,150	0,260
8,0	133,50	1,0066	412,2	1,690	0,151	0,264
10,0	166,44	1,0093	411,4	1,666	0,151	0,267
12,0	199,12	1,0124	410,6	1,647	0,152	0,271
16,0	263,59	1,0197	409,0	1,615	0,153	0,278
20,0	326,65	1,0285	407,7	1,590	0,154	0,284
25,0	403,17	1,0417	406,2	1,565	0,155	0,292
30,0	476,81	1,0569	404,9	1,544	0,156	0,298
35,0	547,38	1,0741	403,9	1,526	0,156	0,303
$T=700\text{ К}$						
0,1	1,44	1,0001	440,7	2,170	0,149	0,248
1,0	14,38	1,0015	440,4	1,941	0,149	0,249
2,0	28,71	1,0030	440,1	1,871	0,149	0,251
3,0	43,00	1,0046	439,8	1,830	0,149	0,252
4,0	57,24	1,0062	439,5	1,801	0,150	0,254
5,0	71,43	1,0079	439,2	1,779	0,150	0,255
6,0	85,56	1,0097	438,9	1,760	0,150	0,256
8,0	113,66	1,0134	438,3	1,730	0,150	0,259
10,0	141,52	1,0174	437,8	1,707	0,151	0,261
14,0	196,45	1,0261	436,8	1,671	0,151	0,266
16,0	223,49	1,0308	436,3	1,657	0,152	0,269
20,0	276,65	1,0409	435,5	1,633	0,152	0,273
25,0	341,28	1,0548	434,6	1,609	0,153	0,278
30,0	403,74	1,0699	433,9	1,588	0,154	0,283
35,0	463,97	1,0862	433,3	1,571	0,155	0,287
40,0	521,92	1,1035	432,9	1,556	0,155	0,290
45,0	577,61	1,1218	432,6	1,543	0,156	0,294

Криптон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=800\text{ K}$						
0,1	1,26	1,0002	465,5	2,203	0,149	0,248
1,0	12,57	1,0019	465,3	1,974	0,149	0,249
2,0	25,10	1,0039	465,1	1,905	0,149	0,250
3,0	37,57	1,0059	464,9	1,864	0,149	0,251
4,0	50,00	1,0080	464,8	1,835	0,149	0,252
5,0	62,37	1,0101	464,6	1,812	0,150	0,253
6,0	74,68	1,0122	464,4	1,794	0,150	0,254
8,0	99,14	1,0166	464,1	1,765	0,150	0,256
10,0	123,38	1,0212	463,7	1,742	0,150	0,258
12,0	147,37	1,0259	463,4	1,723	0,150	0,260
16,0	194,62	1,0358	462,9	1,693	0,151	0,263
20,0	240,83	1,0463	462,4	1,669	0,152	0,266
25,0	297,10	1,0602	462,0	1,645	0,152	0,270
30,0	351,64	1,0749	461,7	1,625	0,153	0,274
35,0	404,44	1,0903	461,4	1,609	0,153	0,277
40,0	455,48	1,1064	461,3	1,594	0,154	0,280
45,0	504,78	1,1231	461,3	1,581	0,155	0,282
50,0	552,37	1,1404	461,4	1,569	0,155	0,285
$T=900\text{ K}$						
0,1	1,12	1,0002	490,3	2,232	0,149	0,248
1,0	11,17	1,0021	490,2	2,003	0,149	0,249
2,0	22,30	1,0043	490,1	1,934	0,149	0,250
3,0	33,38	1,0065	490,0	1,894	0,149	0,250
4,0	44,41	1,0088	489,9	1,865	0,149	0,251
5,0	55,38	1,0110	489,8	1,842	0,149	0,252
6,0	66,31	1,0133	489,7	1,824	0,150	0,253
8,0	88,01	1,0180	489,6	1,795	0,150	0,254
10,0	109,50	1,0228	489,4	1,772	0,150	0,256
12,0	130,77	1,0276	489,3	1,753	0,150	0,257
16,0	172,67	1,0377	489,0	1,723	0,151	0,260
20,0	213,69	1,0482	488,9	1,700	0,151	0,262
25,0	263,69	1,0618	488,8	1,677	0,152	0,265
30,0	312,27	1,0759	488,7	1,657	0,152	0,268
35,0	359,42	1,0905	488,8	1,641	0,153	0,270
40,0	405,17	1,1056	488,9	1,626	0,153	0,273
45,0	449,51	1,1211	489,2	1,614	0,154	0,275
50,0	492,48	1,1370	489,5	1,602	0,154	0,277
60,0	574,43	1,1697	490,3	1,582	0,155	0,280
$T=1000\text{ K}$						
0,1	1,01	1,0002	515,2	2,258	0,149	0,248
1,00	10,06	1,0022	515,1	2,029	0,149	0,249
5,0	49,83	1,0114	515,0	1,869	0,149	0,251
10,0	98,50	1,0232	514,9	1,799	0,150	0,254
20,0	192,30	1,0483	514,9	1,728	0,151	0,259
30,0	281,29	1,0749	515,3	1,685	0,152	0,264
40,0	365,52	1,1030	516,0	1,655	0,153	0,268
50,0	445,12	1,1322	516,9	1,631	0,154	0,271
60,0	520,30	1,1623	518,0	1,612	0,155	0,274
70,0	591,28	1,1932	519,4	1,595	0,155	0,277

Криптон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=1100\text{ K}$						
0,1	0,92	1,0002	540,0	2,282	0,149	0,248
1,0	9,14	1,0022	540,0	2,053	0,149	0,249
5,0	45,30	1,0114	540,1	1,893	0,149	0,251
10,0	89,56	1,0231	540,2	1,823	0,150	0,253
20,0	174,95	1,0475	540,8	1,752	0,151	0,257
30,0	256,19	1,0730	541,5	1,710	0,152	0,261
40,0	333,36	1,0995	542,6	1,680	0,152	0,264
50,0	406,60	1,1268	543,8	1,657	0,153	0,267
60,0	476,10	1,1547	545,2	1,637	0,154	0,270
70,0	542,05	1,1833	546,8	1,621	0,155	0,272
$T=1200\text{ K}$						
0,1	0,84	1,0002	564,8	2,303	0,149	0,248
1,0	8,38	1,0022	564,8	2,075	0,149	0,248
5,0	41,53	1,0112	565,1	1,914	0,149	0,250
10,0	82,13	1,0226	565,5	1,845	0,150	0,252
20,0	160,57	1,0462	566,4	1,775	0,150	0,256
30,0	235,38	1,0705	567,5	1,733	0,151	0,259
40,0	306,66	1,0956	568,9	1,703	0,152	0,262
50,0	374,56	1,1212	570,4	1,680	0,153	0,264
60,0	439,23	1,1473	572,0	1,661	0,154	0,266
70,0	500,85	1,1739	573,8	1,645	0,154	0,268
80,0	559,59	1,2008	575,7	1,630	0,155	0,270
$T=1300\text{ K}$						
0,1	0,78	1,0002	589,6	2,323	0,149	0,248
1,0	7,74	1,0022	589,7	2,095	0,149	0,248
5,0	38,35	1,0109	590,1	1,934	0,149	0,250
10,0	75,86	1,0220	590,6	1,865	0,150	0,251
20,0	148,44	1,0446	591,9	1,795	0,150	0,254
30,0	217,81	1,0679	593,3	1,754	0,151	0,257
40,0	284,10	1,0916	594,9	1,724	0,152	0,260
50,0	347,43	1,1158	596,6	1,701	0,152	0,262
60,0	407,95	1,1403	598,5	1,682	0,153	0,264
70,0	465,81	1,1651	600,5	1,666	0,154	0,265
80,0	521,14	1,1902	602,6	1,652	0,154	0,267
90,0	574,09	1,2154	604,7	1,640	0,155	0,268
$T=1400\text{ K}$						
0,1	0,72	1,0002	614,4	2,342	0,149	0,248
1,0	7,18	1,0021	614,5	2,113	0,149	0,248
5,0	35,62	1,0106	615,0	1,953	0,149	0,250
10,0	70,50	1,0212	615,8	1,884	0,150	0,251
20,0	138,05	1,0430	617,3	1,814	0,150	0,253
30,0	202,77	1,0652	619,0	1,773	0,151	0,256
40,0	264,76	1,0877	620,8	1,743	0,152	0,258
50,0	324,14	1,1105	622,7	1,720	0,152	0,260
60,0	381,04	1,1336	624,8	1,701	0,153	0,261
70,0	435,58	1,1570	626,9	1,685	0,153	0,263
80,0	487,90	1,1805	629,1	1,672	0,154	0,264
90,0	538,11	1,2041	631,4	1,659	0,155	0,266
100,0	586,33	1,2279	633,8	1,648	0,155	0,267

Криптон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=1500\text{ K}$						
0,1	0,67	10,0002	639,2	2,359	0,149	0,248
1,0	6,71	1,0020	639,3	2,130	0,149	0,248
5,0	33,26	1,0102	640,0	1,970	0,149	0,249
10,0	65,84	1,0205	640,8	1,901	0,149	0,250
20,0	129,05	1,0413	642,6	1,831	0,150	0,253
30,0	189,72	1,0625	644,5	1,790	0,151	0,255
40,0	247,97	1,0839	646,5	1,761	0,151	0,256
50,0	303,89	1,1056	648,6	1,738	0,152	0,258
60,0	357,60	1,1274	650,8	1,719	0,152	0,260
70,0	409,21	1,1494	653,1	1,704	0,153	0,261
80,0	458,84	1,1715	655,4	1,690	0,154	0,262
90,0	506,58	1,1938	657,9	1,678	0,154	0,263
100,0	552,55	1,2161	660,3	1,667	0,155	0,264
$T=1750\text{ K}$						
0,1	0,58	1,0002	701,2	2,397	0,149	0,248
1,0	5,75	1,0019	701,4	2,168	0,149	0,248
5,0	28,53	1,0093	702,3	2,009	0,149	0,249
10,0	56,54	1,0186	703,3	1,939	0,149	0,250
20,0	111,04	1,0374	705,6	1,870	0,150	0,251
30,0	163,58	1,0563	707,9	1,829	0,150	0,253
40,0	214,24	1,0753	710,3	1,800	0,151	0,254
50,0	263,12	1,0944	712,8	1,778	0,151	0,255
60,0	310,30	1,1136	715,3	1,759	0,152	0,256
70,0	355,86	1,1329	717,8	1,743	0,152	0,257
80,0	399,88	1,1522	720,5	1,730	0,153	0,258
90,0	442,43	1,1716	723,1	1,718	0,153	0,259
100,0	483,59	1,1910	725,8	1,707	0,154	0,260
120,0	562,01	1,2298	731,3	1,688	0,154	0,261
$T=2000\text{ K}$						
0,1	0,50	1,0002	763,2	2,430	0,149	0,248
1,0	5,03	1,0017	763,4	2,202	0,149	0,248
5,0	24,99	1,0084	764,4	2,042	0,149	0,249
10,0	49,56	1,0169	765,7	1,973	0,149	0,249
20,0	97,49	1,0339	768,3	1,904	0,150	0,250
30,0	143,87	1,0509	770,9	1,863	0,150	0,251
40,0	188,76	1,0679	773,6	1,834	0,150	0,252
50,0	232,23	1,0850	776,3	1,812	0,151	0,253
60,0	274,34	1,1022	779,1	1,793	0,151	0,254
70,0	315,17	1,1193	781,8	1,778	0,152	0,255
80,0	354,76	1,1364	784,7	1,764	0,152	0,256
90,0	393,17	1,1536	787,5	1,752	0,152	0,256
100,0	430,45	1,1707	790,4	1,741	0,153	0,257
120,0	501,86	1,2050	796,2	1,723	0,153	0,258
140,0	569,36	1,2392	802,2	1,707	0,154	0,259
$T=2250\text{ K}$						
0,1	0,45	1,0002	825,2	2,459	0,149	0,248
1,0	4,47	1,0015	825,5	2,231	0,149	0,248
5,0	22,23	1,0077	826,6	2,071	0,149	0,248
10,0	44,12	1,0154	828,0	2,002	0,149	0,249

Криптон

p	ρ	z	h	s	c_t	c_p
20,0	86,91	1,0308	830,8	1,933	0,149	0,250
30,0	128,45	1,0462	833,7	1,893	0,150	0,251
40,0	168,77	1,0617	836,5	1,864	0,150	0,251
45,0	188,50	1,0694	838,0	1,852	0,150	0,252
50,0	207,94	1,0771	839,4	1,841	0,150	0,252
60,0	246,01	1,0925	842,4	1,823	0,151	0,253
70,0	283,01	1,1080	845,3	1,808	0,151	0,253
80,0	319,01	1,1234	848,3	1,794	0,151	0,254
90,0	354,03	1,1388	851,3	1,782	0,152	0,254
100,0	388,13	1,1542	854,4	1,772	0,152	0,255
120,0	453,69	1,1848	860,4	1,753	0,153	0,256
140,0	515,99	1,2154	866,6	1,738	0,153	0,257
160,0	575,29	1,2458	872,8	1,724	0,154	0,257

$T=2500\text{ K}$

0,1	0,40	1,0001	887,2	2,485	0,149	0,248
1,0	4,03	1,0014	887,5	2,257	0,149	0,248
5,0	20,02	1,0070	888,7	2,097	0,149	0,248
10,0	39,76	1,0141	890,2	2,028	0,149	0,249
20,0	78,42	1,0282	893,2	1,959	0,149	0,249
30,0	116,04	1,0423	896,2	1,919	0,150	0,250
40,0	152,66	1,0563	899,3	1,890	0,150	0,251
50,0	188,32	1,0704	902,3	1,868	0,150	0,251
60,0	223,06	1,0844	905,4	1,850	0,150	0,252
70,0	256,92	1,0984	908,5	1,834	0,151	0,252
80,0	289,93	1,1124	911,6	1,821	0,151	0,252
90,0	322,13	1,1264	914,7	1,809	0,151	0,253
100,0	353,54	1,1403	917,9	1,798	0,151	0,253
120,0	414,16	1,1681	924,1	1,780	0,152	0,254
140,0	472,01	1,1958	930,5	1,764	0,152	0,255
160,0	527,30	1,2233	936,8	1,751	0,153	0,255
180,0	580,22	1,2507	943,2	1,739	0,153	0,256

$T=2750\text{ K}$

0,1	0,37	1,0001	949,3	2,509	0,149	0,248
1,0	3,66	1,0013	949,5	2,281	0,149	0,248
5,0	18,21	1,0065	950,8	2,121	0,149	0,248
10,0	36,18	1,0130	952,4	2,052	0,149	0,249
20,0	71,45	1,0259	955,5	1,983	0,149	0,249
30,0	105,84	1,0389	958,6	1,943	0,149	0,250
40,0	139,39	1,0518	961,8	1,914	0,150	0,250
50,0	172,12	1,0647	965,0	1,892	0,150	0,250
60,0	204,08	1,0775	968,2	1,874	0,150	0,251
70,0	235,30	1,0904	971,4	1,858	0,150	0,251
80,0	265,79	1,1032	974,6	1,845	0,151	0,251
90,0	295,59	1,1159	977,8	1,833	0,151	0,252
100,0	324,72	1,1287	981,0	1,822	0,151	0,252
120,0	381,09	1,1541	987,5	1,804	0,151	0,253
140,0	435,09	1,1793	994,0	1,789	0,152	0,253
160,0	486,87	1,2045	1000,4	1,775	0,152	0,254
180,0	536,59	1,2295	1006,9	1,763	0,152	0,254
200,0	584,40	1,2543	1013,4	1,753	0,153	0,255

Криптон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=3000\text{ K}$						
0,1	0,34	1,0001	1011,3	2,531	0,149	0,248
1,0	3,36	1,0012	1011,6	2,302	0,149	0,248
5,0	16,70	1,0060	1012,9	2,142	0,149	0,248
10,0	33,20	1,0120	1014,5	2,074	0,149	0,248
20,0	65,62	1,0240	1017,7	2,005	0,149	0,249
30,0	97,29	1,0359	1021,0	1,964	0,149	0,249
40,0	128,25	1,0478	1024,2	1,936	0,150	0,250
50,0	158,51	1,0597	1027,5	1,914	0,150	0,250
60,0	188,11	1,0716	1030,8	1,895	0,150	0,250
70,0	217,07	1,0834	1034,1	1,880	0,150	0,250
80,0	245,41	1,0952	1037,4	1,867	0,150	0,251
90,0	273,15	1,1070	1040,6	1,855	0,150	0,251
100,0	300,31	1,1187	1043,9	1,844	0,151	0,251
120,0	353,00	1,1421	1050,5	1,826	0,151	0,252
140,0	403,61	1,1654	1057,1	1,811	0,151	0,252
160,0	452,30	1,1885	1063,7	1,797	0,152	0,253
180,0	499,19	1,2115	1070,3	1,785	0,152	0,253
200,0	544,38	1,2343	1076,9	1,775	0,152	0,253
220,0	588,00	1,2570	1083,5	1,765	0,153	0,254

Таблица 2.6. Криптон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=500\text{ K}$						
0,1	287,6	1,67	1,001	413,3	15,4	0,667
1,0	288,5	1,68	1,015	415,1	15,5	0,671
2,0	289,5	1,69	1,029	417,3	15,7	0,676
3,0	290,5	1,71	1,044	419,5	15,9	0,681
4,0	291,7	1,72	1,058	421,8	16,0	0,686
5,0	292,8	1,74	1,071	424,3	16,2	0,690
6,0	294,1	1,76	1,084	426,8	16,4	0,695
8,0	296,8	1,79	1,109	432,1	16,7	0,704
10,0	299,7	1,83	1,132	437,8	17,1	0,713
12,0	302,9	1,86	1,152	443,8	17,5	0,721
16,0	309,9	1,95	1,185	456,8	18,3	0,737
20,0	317,9	2,04	1,207	470,8	19,2	0,750
25,0	329,0	2,16	1,220	489,7	20,3	0,764
30,0	341,0	2,28	1,218	509,5	21,5	0,775
$T=600\text{ K}$						
0,1	315,1	1,67	1,001	473,9	17,6	0,667
1,0	316,1	1,68	1,008	475,4	17,8	0,669
2,0	317,3	1,69	1,016	477,1	17,9	0,672
3,0	318,6	1,70	1,024	478,8	18,0	0,675
4,0	319,8	1,71	1,031	480,6	18,2	0,677
5,0	321,1	1,73	1,038	482,5	18,3	0,680

Криттон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
6,0	322,5	1,74	1,045	484,5	18,5	0,682
8,0	325,3	1,77	1,058	488,5	18,8	0,687
10,0	328,2	1,79	1,069	492,8	19,1	0,691
12,0	331,3	1,82	1,079	497,2	19,4	0,696
16,0	337,8	1,88	1,095	506,8	20,0	0,704
20,0	344,9	1,94	1,105	517,0	20,7	0,710
25,0	354,3	2,02	1,111	530,6	21,6	0,718
30,0	364,3	2,11	1,110	545,0	22,4	0,723
35,0	374,8	2,20	1,103	559,9	23,3	0,728

$T=700\text{ K}$

0,1	340,3	1,67	1,000	530,0	19,7	0,667
1,0	341,5	1,68	1,005	531,2	19,8	0,668
2,0	342,7	1,69	1,009	532,6	19,9	0,670
3,0	344,1	1,70	1,013	534,0	20,1	0,671
4,0	345,4	1,71	1,017	535,5	20,2	0,673
5,0	346,7	1,72	1,021	537,0	20,3	0,674
6,0	348,1	1,73	1,025	538,5	20,4	0,675
8,0	350,9	1,75	1,031	541,8	20,7	0,678
10,0	353,8	1,77	1,037	545,1	20,9	0,680
14,0	359,9	1,82	1,046	552,3	21,5	0,685
16,0	363,0	1,84	1,050	556,1	21,7	0,687
20,0	369,6	1,89	1,054	564,1	22,3	0,691
25,0	378,1	1,95	1,055	574,7	23,0	0,694
30,0	387,0	2,02	1,052	585,8	23,7	0,697
35,0	396,3	2,08	1,046	597,4	24,5	0,700
40,0	405,7	2,15	1,037	609,3	25,2	0,701
45,0	415,4	2,21	1,025	621,5	26,0	0,702

$T=800\text{ K}$

0,1	363,8	1,67	1,000	582,5	21,7	0,667
1,0	365,0	1,68	1,003	583,5	21,8	0,668
2,0	366,3	1,68	1,005	584,7	21,9	0,668
3,0	367,6	1,69	1,007	585,9	22,0	0,669
4,0	369,0	1,70	1,009	587,1	22,1	0,670
5,0	370,3	1,71	1,011	588,3	22,2	0,671
6,0	371,7	1,72	1,013	589,6	22,3	0,672
8,0	374,5	1,74	1,016	592,3	22,5	0,673
10,0	377,3	1,76	1,019	595,0	22,8	0,674
12,0	380,2	1,78	1,021	597,9	23,0	0,676
16,0	386,2	1,81	1,024	604,0	23,4	0,678
20,0	392,4	1,85	1,025	610,4	23,9	0,680
25,0	400,3	1,90	1,023	619,0	24,5	0,682
30,0	408,5	1,96	1,019	628,0	25,2	0,683
35,0	416,9	2,01	1,013	637,4	25,8	0,684
40,0	425,5	2,06	1,005	647,1	26,4	0,685
45,0	434,1	2,11	0,995	657,0	27,1	0,685
50,0	442,9	2,17	0,984	667,2	27,7	0,685

$T=900\text{ K}$

0,1	385,9	1,67	1,000	632,2	23,5	0,667
1,0	387,1	1,67	1,001	633,0	23,6	0,667

Криптон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
2,0	388,4	1,68	1,002	634,0	23,7	0,668
3,0	389,7	1,69	1,003	635,0	23,8	0,668
4,0	391,0	1,70	1,004	636,1	23,9	0,669
5,0	392,4	1,71	1,005	637,1	24,0	0,669
6,0	393,7	1,71	1,006	638,2	24,1	0,669
8,0	396,5	1,73	1,007	640,4	24,3	0,670
10,0	399,2	1,75	1,008	642,7	24,5	0,671
12,0	402,1	1,76	1,009	645,1	24,7	0,671
16,0	407,8	1,79	1,008	650,2	25,1	0,673
20,0	413,7	1,83	1,007	655,6	25,5	0,673
25,0	421,1	1,87	1,004	662,7	26,1	0,674
30,0	428,8	1,91	0,999	670,1	26,6	0,675
35,0	436,6	1,96	0,992	677,9	27,2	0,675
40,0	444,5	2,00	0,984	686,0	27,7	0,675
45,0	452,5	2,05	0,975	694,4	28,3	0,675
50,0	460,6	2,09	0,966	702,9	28,8	0,674
60,0	476,8	2,18	0,945	720,4	30,0	0,673

$T=1000\text{ K}$

0,1	406,8	1,67	1,000	679,5	25,3	0,667
1,0	407,9	1,67	1,000	680,3	25,4	0,667
5,0	413,2	1,70	1,001	683,7	25,7	0,668
10,0	419,9	1,74	1,001	688,5	26,2	0,669
20,0	433,7	1,81	0,996	699,4	27,1	0,669
30,0	448,1	1,88	0,985	711,7	28,1	0,669
40,0	462,8	1,96	0,971	725,2	29,1	0,669
50,0	477,8	2,03	0,954	739,5	30,1	0,667
60,0	492,9	2,11	0,935	754,6	31,1	0,666
70,0	508,0	2,18	0,915	770,0	32,1	0,664

$T=1100\text{ K}$

0,1	426,6	1,67	1,000	724,9	27,0	0,667
1,0	427,8	1,67	1,000	725,6	27,0	0,667
5,0	432,9	1,70	0,999	728,5	27,4	0,667
10,0	439,4	1,73	0,996	732,6	27,8	0,667
20,0	452,8	1,79	0,988	741,9	28,6	0,667
30,0	466,5	1,86	0,977	752,4	29,5	0,666
40,0	480,4	1,92	0,962	764,0	30,4	0,664
50,0	494,5	1,99	0,946	776,4	31,3	0,663
60,0	508,7	2,05	0,928	789,5	32,2	0,661
70,0	522,9	2,12	0,910	803,0	33,1	0,659

$T=1200\text{ K}$

0,1	445,6	1,67	1,000	768,6	28,6	0,667
1,0	446,7	1,67	0,999	769,2	28,7	0,667
5,0	451,7	1,69	0,997	771,7	29,0	0,666
10,0	458,0	1,72	0,993	775,2	29,3	0,666
20,0	471,0	1,78	0,983	783,2	30,1	0,665
30,0	484,1	1,84	0,971	792,4	30,9	0,663
40,0	497,4	1,90	0,957	802,4	31,7	0,661
50,0	510,8	1,95	0,941	813,2	32,6	0,659
60,0	524,2	2,01	0,924	824,6	33,4	0,657
70,0	537,7	2,07	0,907	836,5	34,2	0,655
80,0	551,1	2,12	0,890	848,7	35,1	0,653

Криптон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=1300\text{ K}$						
0,1	463,8	1,67	1,000	810,8	30,2	0,667
1,0	464,9	1,67	0,999	811,3	30,2	0,667
5,0	469,8	1,69	0,996	813,5	30,5	0,666
10,0	475,9	1,72	0,991	816,5	30,9	0,665
20,0	488,4	1,77	0,980	823,5	31,6	0,663
30,0	501,0	1,82	0,967	831,4	32,3	0,661
40,0	513,8	1,87	0,953	840,2	33,1	0,659
50,0	526,6	1,93	0,938	849,7	33,8	0,657
60,0	539,4	1,98	0,922	859,7	34,6	0,655
70,0	552,2	2,03	0,906	870,2	35,4	0,653
80,0	565,0	2,08	0,889	881,1	36,2	0,650
90,0	577,7	2,13	0,873	892,2	36,9	0,648
$T=1400\text{ K}$						
0,1	481,3	1,67	1,000	851,8	31,7	0,667
1,0	482,3	1,67	0,999	852,2	31,8	0,666
5,0	487,1	1,69	0,995	854,1	32,0	0,666
10,0	493,1	1,71	0,990	856,7	32,3	0,665
20,0	505,2	1,76	0,978	862,7	33,0	0,662
30,0	517,4	1,81	0,965	869,7	33,7	0,660
40,0	529,7	1,86	0,950	877,4	34,4	0,658
50,0	542,0	1,90	0,936	885,7	35,1	0,655
60,0	554,3	1,95	0,920	894,6	35,8	0,653
70,0	566,5	2,00	0,905	903,9	36,5	0,650
80,0	578,7	2,04	0,890	913,6	37,3	0,648
90,0	590,9	2,09	0,874	923,7	38,0	0,646
100,0	603,0	2,13	0,859	933,9	38,7	0,644
$T=1500\text{ K}$						
0,1	498,2	1,67	1,000	891,6	33,2	0,667
1,0	499,2	1,67	0,999	891,9	33,2	0,666
5,0	503,9	1,69	0,995	893,5	33,5	0,665
10,0	509,7	1,71	0,989	895,8	33,8	0,664
20,0	521,4	1,75	0,976	901,1	34,4	0,662
30,0	533,3	1,80	0,963	907,2	35,1	0,659
40,0	545,1	1,84	0,949	913,7	35,7	0,657
50,0	556,9	1,89	0,935	921,3	36,4	0,654
60,0	568,8	1,93	0,920	929,2	37,0	0,651
70,0	580,6	1,97	0,905	937,6	37,7	0,649
80,0	592,3	2,01	0,891	946,3	38,4	0,647
90,0	604,0	2,05	0,876	955,3	39,0	0,644
100,0	615,6	2,09	0,861	964,5	39,7	0,642
$T=1750\text{ K}$						
0,1	538,1	1,67	1,000	986,7	36,7	0,667
1,0	539,0	1,67	0,999	986,9	36,8	0,666
5,0	543,4	1,69	0,994	988,1	37,0	0,665
10,0	548,9	1,70	0,988	989,7	37,2	0,664
20,0	559,9	1,74	0,975	993,4	37,8	0,661
30,0	570,9	1,78	0,961	997,8	38,3	0,658
40,0	581,8	1,81	0,948	1002,8	38,9	0,655
50,0	592,8	1,85	0,935	1008,3	39,5	0,652

Криптон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
60,0	603,7	1,88	0,921	1014,3	40,0	0,649
70,0	614,5	1,92	0,908	1020,6	40,6	0,647
80,0	625,3	1,95	0,894	1027,3	41,2	0,644
90,0	636,0	1,99	0,881	1034,3	41,8	0,642
100,0	646,7	2,02	0,868	1041,6	42,4	0,639
120,0	667,7	2,09	0,843	1056,8	43,5	0,635

$T=2000$ K

0,1	575,2	1,67	1,000	1076,7	40,1	0,667
1,0	576,1	1,67	0,999	1076,9	40,1	0,666
5,0	580,3	1,68	0,994	1077,6	40,3	0,665
10,0	585,4	1,70	0,987	1078,7	40,5	0,663
20,0	595,8	1,73	0,975	1081,4	41,0	0,660
30,0	606,1	1,76	0,962	1084,6	41,5	0,657
40,0	616,3	1,79	0,949	1088,3	42,0	0,654
50,0	626,6	1,82	0,936	1092,4	42,5	0,651
60,0	636,7	1,85	0,924	1097,0	43,0	0,648
70,0	646,9	1,88	0,911	1101,9	43,5	0,646
80,0	656,9	1,91	0,899	1107,1	44,0	0,643
90,0	666,9	1,94	0,887	1112,6	44,5	0,641
100,0	676,8	1,97	0,875	1118,4	45,0	0,638
120,0	696,4	2,03	0,852	1130,6	46,0	0,634
140,0	715,8	2,08	0,830	1143,5	47,1	0,629

$T=2250$ K

0,1	610,1	1,67	1,000	1162,5	43,3	0,667
1,0	611,0	1,67	0,999	1162,6	43,3	0,666
5,0	614,9	1,68	0,994	1163,1	43,5	0,665
10,0	619,8	1,69	0,988	1163,8	43,7	0,663
20,0	629,6	1,72	0,975	1165,7	44,1	0,660
30,0	639,3	1,75	0,963	1168,0	44,5	0,657
40,0	649,0	1,78	0,951	1170,8	45,0	0,654
50,0	658,7	1,80	0,939	1173,9	45,4	0,651
60,0	668,2	1,83	0,927	1177,4	45,9	0,648
70,0	677,8	1,86	0,916	1181,2	46,3	0,646
80,0	687,2	1,88	0,905	1185,3	46,8	0,643
90,0	696,6	1,91	0,893	1189,7	47,2	0,640
100,0	706,0	1,93	0,882	1194,3	47,7	0,638
120,0	724,5	1,98	0,861	1204,1	48,6	0,633
140,0	742,7	2,03	0,841	1214,7	49,5	0,629
160,0	760,6	2,08	0,821	1225,8	50,4	0,625

$T=2500$ K

0,1	643,1	1,67	1,000	1244,8	46,3	0,667
1,0						
1,67	0,999	1244,9	46,4	0,666		
5,0	647,6	1,68	0,994	1245,1	46,5	0,665
10,0	652,3	1,69	0,988	1245,6	46,7	0,663
20,0	661,6	1,72	0,976	1246,8	47,1	0,660
30,0	670,9	1,74	0,965	1248,5	47,5	0,657
40,0	680,1	1,77	0,953	1250,5	47,9	0,654
50,0	689,3	1,79	0,942	1252,9	48,3	0,651
60,0	698,4	1,81	0,931	1255,6	48,7	0,649
70,0	707,4	1,84	0,920	1258,5	49,1	0,646

Криптон

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
80,0	716,4	1,86	0,910	1261,8	49,5	0,643
90,0	725,3	1,88	0,899	1265,2	49,9	0,641
100,0	734,2	1,91	0,889	1268,9	50,3	0,638
120,0	751,7	1,95	0,869	1276,9	51,2	0,634
140,0	769,0	1,99	0,850	1285,6	52,0	0,629
160,0	786,0	2,04	0,832	1294,9	52,8	0,625
180,0	802,8	2,08	0,815	1304,6	53,7	0,622

T=2750 K

0,1	674,4	1,67	1,000	1324,1	49,3	0,667
1,0	675,2	1,67	0,999	1324,1	49,3	0,666
5,0	678,8	1,68	0,994	1324,2	49,4	0,665
10,0	683,3	1,69	0,989	1324,5	49,6	0,664
20,0	692,2	1,71	0,978	1325,3	50,0	0,660
30,0	701,0	1,73	0,967	1326,4	50,3	0,658
40,0	709,8	1,76	0,956	1327,8	50,7	0,655
50,0	718,6	1,78	0,945	1329,6	51,1	0,652
60,0	727,2	1,80	0,935	1331,6	51,4	0,649
70,0	735,9	1,82	0,925	1333,9	51,8	0,647
80,0	744,4	1,84	0,915	1336,5	52,2	0,644
90,0	753,0	1,86	0,905	1339,3	52,6	0,642
100,0	761,4	1,88	0,895	1342,2	52,9	0,639
120,0	778,2	1,92	0,877	1348,8	53,7	0,635
140,0	794,7	1,96	0,859	1355,9	54,5	0,630
160,0	811,0	2,00	0,842	1363,7	55,2	0,626
180,0	827,0	2,04	0,826	1371,9	56,0	0,623
200,0	842,8	2,08	0,810	1380,5	56,8	0,619

T=3000 K

0,1	704,4	1,67	1,000	1400,8	52,1	0,667
1,0	705,2	1,67	0,999	1400,8	52,1	0,666
5,0	708,6	1,68	0,995	1400,8	52,3	0,665
10,0	712,9	1,69	0,989	1400,8	52,4	0,664
14,0	716,3	1,70	0,985	1401,0	52,6	0,662
16,0	718,0	1,70	0,983	1401,0	52,6	0,662
20,0	721,4	1,71	0,979	1401,2	52,8	0,661
30,0	729,9	1,73	0,968	1402,0	53,1	0,658
40,0	738,3	1,75	0,958	1403,0	53,4	0,655
50,0	746,7	1,77	0,948	1404,3	53,8	0,652
60,0	755,0	1,79	0,938	1405,8	54,1	0,650
70,0	763,3	1,81	0,929	1407,6	54,5	0,647
80,0	771,5	1,83	0,919	1409,6	54,8	0,645
90,0	779,7	1,84	0,910	1411,8	55,2	0,642
100,0	787,8	1,86	0,901	1414,2	55,5	0,640
120,0	803,8	1,90	0,884	1419,5	56,2	0,636
140,0	819,7	1,94	0,867	1425,4	56,9	0,632
160,0	835,3	1,97	0,851	1431,9	57,6	0,628
180,0	850,7	2,01	0,835	1438,9	58,3	0,624
200,0	866,0	2,04	0,821	1446,2	59,0	0,620
220,0	881,0	2,07	0,806	1454,0	59,7	0,617

2.3. Ксенон

В табл. 2.7 представлены работы, в которых исследована сжимаемость ксенона в газообразном состоянии.

Таблица 2.7. Экспериментальные исследования сжимаемости ксенона в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Автор	Литературный источник
290—573	2—40	Битти (1951)	[43]
273—423	20—280	Михельс, Вассенаар, Лауэрс (1954)	[44]
273—973	1—5	Валлей, Люпье, Шнейдер (1955)	[45]
308—723	3—45	Рабинович (1970)	[33]

Среди опубликованных p/T -данных газообразного ксенона надежными являются данные Амстердамской лаборатории [44]. Плотность измерена в довольно широкой области параметров состояния на семи изотермах от 273 до 423 К.

Валлей с сотрудниками [45] исследовали термические свойства ксенона методом Барнетта в более широком интервале температур до давления 5 МПа. Авторы представили данные в виде вириального уравнения состояния в ряде до давлению. В процессе обработки использованы значения плотности, рассчитанные по этому уравнению.

Битти и соавторы [43] представили свои экспериментальные данные на тринадцати изотермах в довольно широкой области параметров состояния. Однако данные [43], по-видимому, не отличаются высокой точностью из-за недостаточной чистоты исследуемого вещества; они отклоняются от данных о сжимаемости других авторов на 0,25—0,8%.

Значительно расширили область исследования термических свойств ксенона Рабинович и сотрудники [33]. Авторы оценивают среднюю погрешность экспериментальных данных в 0,15%.

Попытка описать с высокой точностью экспериментальные данные уравнением (1.3) с использованием потенциала Леннарда-Джонса (12-6) не дала удовлетворительных результатов. При этом для второго, четвертого и пятого вириальных коэффициентов использованы аппроксимирующие полиномы, приведенные в § 2.1. В третий вириальный коэффициент введена поправка на неаддитивность. В табл. 2.8 показаны некоторые варианты такой аппроксимации.

Из табл. 2.8 видно, что применение потенциала Леннарда-Джонса (12-6) не позволяет описать экспериментальные данные о сжимаемости ксенона с высокой точностью, причем последние несколько возрастает с повышением нижнего температурного предела. Однако при низкой точности описания экспериментальных данных нельзя успешно решить задачу экстраполяции уравнения состояния за пределы экспериментальной области.

Использование потенциала сферической оболочки резко увеличило точность уравнения состояния ксенона. Обработано 87 экспериментальных точек: 28 точек из работы [44], 11 точек из [45], 23 точки из [43], 25 точек из [33]. Область обработки экспериментальных данных показана штриховкой на рис. 2.5. Она лежит в интервале температур 323—723 К и плотностей 0—600 кг/м³.

Второй, третий и четвертый вириальные коэффициенты потенциала сферической оболочки, рассчитанные в работах [6—8], аппроксимированы с высокой точностью полиномами по обратной приведенной температуре. Аппроксимация B^* и C^* произведена в интервале $T^*=0,6 \div 10$, D^* — в интервале $T^*=0,9 \div 10$.

Таблица 2.8. Варианты обработки pVT -данных ксенона с помощью потенциала Леннарда-Джонса (12-6)

Интервал температур, К	Число точек	Функционал	$b_0 \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$\epsilon/k, \text{ К}$	Литература
298—423	40	30 000	0,298	178,8	[44]
373—423	30	4400	0,542	199,8	
398—423	8	488	0,981	176,9	
273—773	14	17 500	0,902	126,5	[45]
373—773	11	172	0,514	211,4	
423—773	10	55	0,460	221,1	
298—573	24	25 000	0,674	157,7	[43]
323—573	11	6143	0,584	150,2	
398—573	8	513	0,273	224,2	

Поправка на неаддитивность в третьем вириальном коэффициенте не вводилась.

Третий параметр потенциала r_0^* сферической оболочки для ксенона принят равным 2,5. Средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных полученным уравнением состояния составляет 0,10%, т. е. точность уравнения находится в соответствии с точностью заложенных в него экспериментальных данных.

По полученному уравнению состояния рассчитаны таблицы термодинамических свойств ксенона. При этом идеально-газовая теплоемкость считалась постоянной в широком интервале температур и комплекс $c_p^0/R=2,5$ [36, 42]. За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. Теплота сублимации при температуре 0 К по данным [37] равна 120769,23 Дж/кг. Поэтому комплекс, используемый в программе расчета термодинамических функций, имеет вид

$$(h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0)/(RT) = 2,5 + 1,907186\tau, \quad (2.19)$$

где $\tau = 1000/T$.

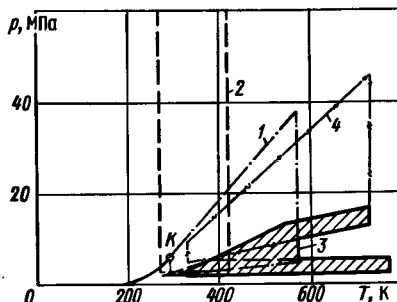
В [42] значения стандартной энтропии ксенона в идеально-газовом состоянии приводятся от 293,15 К, поэтому за базовую точку отсчета энтропии принимаем $T=293,15 \text{ К}$, и для расчета величины s^0/R получаем

$$\frac{s^0}{R} = \frac{s_{293,15}^0}{R} + \int_{293,15}^T \frac{c_p^0 dT}{RT} = \left(\frac{s^0}{R}\right)_{293,15} + \frac{c_p^0}{R} \ln \frac{T}{293,15}.$$

Или с учетом констант имеем

$$s^0/R = 20,353718 + 2,5 \ln(T/293,15). \quad (2.20)$$

Рис. 2.5. Область обработки данных о сжимаемости газообразного ксенона: 1 — [43]; 2 — [44]; 3 — [45]; 4 — [33]



Значения основных величин, используемые при расчете таблиц теплофизических свойств ксенона:

масса моля $\mu = 131,30$ г/моль;

газовая постоянная $R = 63,323$ Дж/(кг · К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^s = 1,20769,23 \cdot 10^5$ Дж/кг;

константы потенциала сферической оболочки: $b_0 = 0,666669 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\epsilon/k = 327,963$ К.

Константы аппроксимации приведенных вириальных коэффициентов:

$$\begin{array}{lll} a_0 = 5,28450719 \cdot 10^{-1} & c_0 = 1,72333386 \cdot 10^{-1} & d_0 = 1,26126720 \cdot 10^{-2} \\ a_1 = -2,01111553 \cdot 10^{-1} & c_1 = 5,68449614 \cdot 10^{-1} & d_1 = 1,04147677 \cdot 10^0 \\ a_2 = -5,51370335 \cdot 10^0 & c_2 = -3,74179650 \cdot 10^0 & d_2 = -7,18032235 \cdot 10^0 \\ a_3 = 1,37348921 \cdot 10^1 & c_3 = 1,10382618 \cdot 10^1 & d_3 = 2,69533520 \cdot 10^1 \\ a_4 = -2,34337859 \cdot 10^1 & c_4 = -1,74717686 \cdot 10^1 & d_4 = -6,04337878 \cdot 10^1 \\ a_5 = 2,48024779 \cdot 10^1 & c_5 = 1,73821830 \cdot 10^1 & d_5 = 7,66124754 \cdot 10^1 \\ a_6 = -1,58065834 \cdot 10^1 & c_6 = -1,06315952 \cdot 10^1 & d_6 = -4,98246799 \cdot 10^1 \\ a_7 = 5,51319256 \cdot 10^0 & c_7 = 3,53988087 \cdot 10^0 & d_7 = 1,29550787 \cdot 10^1 \\ a_8 = -8,05689249 \cdot 10^{-1} & c_8 = -5,15322845 \cdot 10^{-1} & \end{array}$$

Для расчета таблиц теплопроводности и вязкости ксенона применен потенциал Леннарда-Джонса (12-6). Константы потенциала получены в результате обработки данных о вязкости и теплопроводности ксенона при атмосферном давлении из работы [34] и данных о вязкости и теплопроводности при повышенном давлении из работы [33]. Константы имеют следующие значения: $\epsilon/k = 294,11070$ К; $b_0 = 0,5493196 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; погрешности: $\delta\eta = 0,15\%$; $\delta\lambda = 2,2\%$.

Расчет вязкости и теплопроводности ксенона производился по уравнениям (1.24) — (1.27) с использованием констант аппроксимации соответствующих функций, приведенных в § 2.1.

Авторы отдают себе отчет в том, что применение различных потенциалов межмолекулярного взаимодействия для расчета равновесных и неравновесных свойств ксенона снижает теоретический уровень предлагаемых таблиц. Однако такое решение является вынужденной мерой, так как вязкостные и теплопроводностные вириальные коэффициенты по сферически симметричному потенциалу не рассчитаны.

Расчитанные значения теплофизических свойств ксенона приведены в табл. 2.9 и 2.10.

Таблица 2.9. Ксенон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 500$ К						
0,1	3,16	0,9991	199,8	1,374	0,095	0,159
1,0	31,87	0,9911	198,8	1,227	0,096	0,163
2,0	64,31	0,9823	197,6	1,181	0,096	0,167
3,0	97,33	0,9735	196,4	1,154	0,097	0,172
4,0	130,94	0,9649	195,2	1,134	0,098	0,177
5,0	165,13	0,9563	194,0	1,118	0,099	0,182
6,0	199,91	0,9479	192,8	1,104	0,099	0,187
8,0	271,23	0,9316	190,4	1,082	0,101	0,199
10,0	344,82	0,9160	188,0	1,064	0,102	0,211
12,0	420,52	0,9013	185,5	1,049	0,103	0,224
16,0	577,25	0,8754	180,6	1,023	0,106	0,251
$T = 600$ К						
0,1	2,63	0,9996	215,7	1,403	0,095	0,159
1,0	26,42	0,9963	214,9	1,256	0,095	0,161
2,0	53,03	0,9927	214,1	1,211	0,096	0,164
3,0	79,82	0,9892	213,3	1,184	0,096	0,167

Ксенон

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
4,0	106,79	0,9858	212,5	1,165	0,097	0,169
5,0	133,93	0,9826	211,7	1,150	0,097	0,172
6,0	161,23	0,9795	210,9	1,137	0,097	0,175
8,0	216,25	0,9737	209,3	1,117	0,098	0,181
10,0	271,75	0,9685	207,7	1,100	0,099	0,187
12,0	327,64	0,9640	206,1	1,086	0,100	0,193
16,0	440,07	0,9569	203,0	1,064	0,101	0,206
20,0	552,49	0,9528	200,1	1,045	0,102	0,218

T = 650 K

10,0	247,11	0,9832	216,9	1,115	0,098	0,181
12,0	297,11	0,9813	215,6	1,102	0,099	0,186
16,0	397,02	0,9791	213,0	1,080	0,100	0,195
20,0	496,26	0,9791	210,6	1,062	0,101	0,205

T = 700 K

0,1	2,26	0,9999	231,5	1,427	0,095	0,158
1,0	22,58	0,9989	231,0	1,281	0,095	0,160
2,0	45,21	0,9979	230,4	1,236	0,095	0,162
3,0	67,88	0,9971	229,8	1,210	0,096	0,164
4,0	90,58	0,9963	229,2	1,191	0,096	0,166
5,0	113,30	0,9956	228,6	1,176	0,096	0,168
6,0	136,04	0,9950	228,1	1,164	0,096	0,169
8,0	181,55	0,9941	226,9	1,144	0,097	0,173
10,0	227,04	0,9936	225,8	1,128	0,097	0,177
12,0	272,46	0,9936	224,7	1,115	0,098	0,181
16,0	362,84	0,9948	222,6	1,094	0,099	0,188
20,0	452,21	0,9978	220,6	1,077	0,100	0,195
25,0	561,84	1,0038	218,3	1,060	0,100	0,204

T = 800 K

0,1	1,97	1,0000	247,4	1,449	0,095	0,158
1,0	19,73	1,0004	247,0	1,302	0,095	0,160
2,0	39,45	1,0008	246,5	1,258	0,095	0,161
3,0	59,14	1,0013	246,1	1,232	0,096	0,162
4,0	78,81	1,0019	245,7	1,213	0,096	0,164
5,0	98,44	1,0026	245,3	1,198	0,096	0,165
6,0	118,05	1,0033	244,8	1,186	0,096	0,166
8,0	157,13	1,0050	244,0	1,167	0,096	0,169
10,0	196,03	1,0070	243,2	1,151	0,097	0,171
12,0	234,72	1,0092	242,4	1,139	0,097	0,174
16,0	311,30	1,0146	240,9	1,119	0,098	0,179
20,0	386,66	1,0211	239,5	1,102	0,098	0,184
25,0	478,81	1,0307	237,9	1,086	0,099	0,190
30,0	568,39	1,0419	236,4	1,072	0,099	0,195

T = 900 K

0,1	1,75	1,0001	263,2	1,467	0,095	0,158
1,0	17,53	1,0012	262,9	1,321	0,095	0,159
2,0	35,01	1,0025	262,6	1,277	0,095	0,160
3,0	52,44	1,0038	262,3	1,251	0,095	0,161
4,0	69,83	1,0051	262,0	1,232	0,095	0,162
5,0	87,16	1,0066	261,7	1,217	0,096	0,163
6,0	104,44	1,0080	261,4	1,205	0,096	0,164

Ксенон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
8,0	138,83	1,0111	260,8	1,186	0,096	0,166
10,0	172,97	1,0144	260,2	1,171	0,096	0,168
12,0	206,86	1,0179	259,6	1,159	0,096	0,170
16,0	273,77	1,0255	258,6	1,139	0,097	0,174
20,0	339,46	1,0338	257,6	1,124	0,097	0,177
25,0	419,68	1,0452	256,4	1,108	0,098	0,181
30,0	497,66	1,0578	255,4	1,094	0,098	0,185
35,0	573,30	1,0712	254,4	1,083	0,099	0,189
$T=1000$ K						
0,1	1,58	1,0002	279,1	1,484	0,095	0,158
1,0	15,77	1,0017	278,8	1,338	0,095	0,159
5,0	78,27	1,0089	277,9	1,235	0,095	0,162
10,0	155,03	1,0187	276,9	1,189	0,096	0,166
20,0	303,43	1,0409	275,1	1,142	0,097	0,173
30,0	444,30	1,0663	273,6	1,114	0,098	0,179
40,0	577,16	1,0945	272,5	1,093	0,098	0,185
$T=1100$ K						
0,1	1,44	1,0002	294,9	1,499	0,095	0,158
1,0	14,33	1,0020	294,7	1,353	0,095	0,159
5,0	71,06	1,0102	294,1	1,250	0,095	0,161
10,0	140,60	1,0211	293,4	1,205	0,096	0,164
20,0	274,83	1,0448	292,2	1,158	0,097	0,170
30,0	402,24	1,0707	291,3	1,130	0,097	0,175
40,0	522,69	1,0986	290,7	1,110	0,098	0,180
$T=1200$ K						
0,1	1,32	1,0002	310,7	1,513	0,095	0,158
1,0	13,13	1,0021	310,6	1,367	0,095	0,159
5,0	65,09	1,0109	310,2	1,264	0,095	0,161
10,0	128,72	1,0224	309,8	1,219	0,096	0,163
20,0	251,46	1,0467	309,1	1,173	0,096	0,168
30,0	368,05	1,0727	308,7	1,146	0,097	0,172
40,0	478,51	1,1001	308,4	1,126	0,097	0,176
50,0	582,98	1,1287	308,4	1,110	0,098	0,179
$T=1300$ K						
0,1	1,21	1,0002	326,6	1,525	0,095	0,158
1,0	12,12	1,0022	326,5	1,379	0,095	0,159
5,0	60,06	1,0113	326,3	1,277	0,095	0,160
10,0	118,75	1,0230	326,1	1,232	0,096	0,162
20,0	231,96	1,0474	325,8	1,186	0,096	0,166
30,0	339,61	1,0731	325,7	1,159	0,097	0,170
40,0	441,79	1,0999	325,9	1,140	0,097	0,173
50,0	538,71	1,1275	326,2	1,124	0,098	0,176
$T=1400$ K						
0,1	1,13	1,0002	342,4	1,537	0,095	0,158
1,0	11,25	1,0023	342,4	1,391	0,095	0,159
5,0	55,76	1,0114	342,3	1,289	0,095	0,160
10,0	110,25	1,0231	342,3	1,244	0,096	0,162
20,0	215,39	1,0474	342,4	1,199	0,096	0,165
30,0	315,49	1,0726	342,6	1,172	0,096	0,168

Ксенон

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
40,0	410,70	1,0986	343,1	1,152	0,097	0,171
50,0	501,21	1,1253	343,6	1,137	0,097	0,173
60,0	587,26	1,1525	344,3	1,124	0,098	0,175
<i>T</i> = 1500 K						
0,1	1,05	1,0002	358,2	1,548	0,095	0,158
1,0	10,50	1,0023	358,2	1,402	0,095	0,159
5,0	52,05	1,0114	358,3	1,300	0,095	0,160
10,0	102,91	1,0230	358,4	1,255	0,095	0,161
20,0	201,12	1,0469	358,8	1,210	0,096	0,164
30,0	294,76	1,0715	359,4	1,183	0,096	0,167
40,0	383,97	1,0967	360,0	1,164	0,097	0,169
50,0	468,97	1,1225	360,8	1,149	0,097	0,171
60,0	549,96	1,1486	361,7	1,136	0,098	0,173
<i>T</i> = 1750 K						
0,1	0,90	1,0002	397,8	1,573	0,095	0,158
1,0	9,00	1,0022	397,9	1,427	0,095	0,159
5,0	44,63	1,0110	398,2	1,324	0,095	0,159
10,0	88,29	1,0221	398,7	1,280	0,095	0,160
20,0	172,76	1,0447	399,6	1,235	0,096	0,162
30,0	253,57	1,0676	400,7	1,209	0,096	0,164
40,0	330,89	1,0909	401,9	1,190	0,096	0,166
50,0	404,90	1,1144	403,1	1,175	0,097	0,168
60,0	475,76	1,1381	404,5	1,163	0,097	0,169
70,0	543,66	1,1619	405,9	1,152	0,097	0,170
<i>T</i> = 2000 K						
0,1	0,79	1,0002	437,4	1,594	0,095	0,158
1,0	7,88	1,0021	437,5	1,448	0,095	0,158
5,0	39,07	1,0104	438,0	1,346	0,095	0,159
10,0	77,35	1,0208	438,7	1,301	0,095	0,160
20,0	151,57	1,0419	440,1	1,257	0,096	0,161
30,0	222,81	1,0632	441,6	1,231	0,096	0,163
40,0	291,21	1,0846	443,1	1,212	0,096	0,164
50,0	356,93	1,1061	444,7	1,197	0,096	0,165
60,0	420,10	1,1277	446,4	1,185	0,097	0,166
70,0	480,87	1,1494	448,1	1,175	0,097	0,167
80,0	539,37	1,1711	449,8	1,166	0,097	0,168
90,0	595,73	1,1929	451,6	1,158	0,097	0,169
<i>T</i> = 2250 K						
0,1	0,70	1,0002	477,0	1,612	0,095	0,158
1,0	7,01	1,0019	477,1	1,466	0,095	0,158
5,0	34,75	1,0097	477,8	1,364	0,095	0,159
10,0	68,84	1,0195	478,6	1,320	0,095	0,160
20,0	135,09	1,0391	480,3	1,276	0,095	0,161
30,0	198,86	1,0588	482,1	1,250	0,096	0,162
40,0	260,29	1,0786	483,9	1,231	0,096	0,163
50,0	319,49	1,0984	485,8	1,217	0,096	0,164
60,0	376,59	1,1182	487,7	1,205	0,096	0,164
70,0	431,69	1,1381	489,6	1,194	0,096	0,165
80,0	484,89	1,1580	491,6	1,186	0,097	0,166
90,0	536,31	1,1778	493,6	1,178	0,097	0,167
100,0	586,04	1,1976	495,6	1,171	0,097	0,168

Kсенон

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	c_v	c_p
<i>T</i> = 2500 K						
0,1	0,63	1,0002	516,6	1,629	0,095	0,158
1,0	6,31	1,0018	516,7	1,483	0,095	0,158
5,0	31,30	1,0091	517,5	1,381	0,095	0,159
10,0	62,04	1,0182	518,5	1,337	0,095	0,159
20,0	121,89	1,0365	520,4	1,293	0,095	0,160
30,0	179,66	1,0548	522,4	1,267	0,096	0,161
40,0	235,46	1,0731	524,5	1,248	0,096	0,162
50,0	289,38	1,0914	526,6	1,234	0,096	0,162
60,0	341,53	1,1098	528,7	1,222	0,096	0,163
70,0	391,98	1,1281	530,8	1,212	0,096	0,164
80,0	440,83	1,1463	532,9	1,203	0,096	0,165
90,0	488,17	1,1646	535,1	1,195	0,097	0,165
100,0	534,06	1,1828	537,3	1,188	0,097	0,166
<i>T</i> = 2750 K						
0,1	0,57	1,0002	556,1	1,644	0,095	0,158
1,0	5,73	1,0017	556,3	1,498	0,095	0,158
5,0	28,47	1,0085	557,2	1,396	0,095	0,159
10,0	56,46	1,0170	558,3	1,352	0,095	0,159
20,0	111,06	1,0341	560,4	1,308	0,095	0,160
30,0	163,89	1,0511	562,6	1,282	0,095	0,160
40,0	215,04	1,0682	564,8	1,264	0,096	0,161
50,0	264,58	1,0852	567,1	1,249	0,096	0,162
60,0	312,60	1,1022	569,3	1,237	0,096	0,162
70,0	359,18	1,1192	571,6	1,227	0,096	0,163
80,0	404,37	1,1361	573,9	1,219	0,096	0,163
90,0	448,25	1,1530	576,2	1,211	0,096	0,164
100,0	490,89	1,1698	578,5	1,204	0,096	0,164
120,0	572,65	1,2034	583,2	1,192	0,097	0,165
<i>T</i> = 3000 K						
0,1	0,53	1,0002	595,7	1,658	0,095	0,158
1,0	5,26	1,0016	595,9	1,512	0,095	0,158
5,0	26,11	1,0080	596,8	1,410	0,095	0,159
10,0	51,81	1,0160	598,0	1,366	0,095	0,159
20,0	102,02	1,0319	600,3	1,322	0,095	0,159
30,0	150,70	1,0479	602,7	1,296	0,095	0,160
40,0	197,93	1,0638	605,0	1,278	0,095	0,161
50,0	243,78	1,0797	607,4	1,263	0,096	0,161
60,0	288,31	1,0955	609,8	1,251	0,096	0,162
70,0	331,57	1,1113	612,2	1,241	0,096	0,162
80,0	373,64	1,1271	614,6	1,233	0,096	0,162
90,0	414,57	1,1428	617,0	1,225	0,096	0,163
100,0	454,41	1,1584	619,5	1,218	0,096	0,163
120,0	531,00	1,1896	624,3	1,206	0,096	0,164

Таблица 2.10. Ксенон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=500\text{ K}$						
0,1	229,7	1,67	1,004	369,8	8,8	0,668
1,0	229,9	1,68	1,037	372,7	8,9	0,678
2,0	230,1	1,70	1,075	376,1	9,1	0,690
3,0	230,4	1,72	1,115	379,8	9,3	0,702
4,0	230,8	1,74	1,156	383,7	9,5	0,715
5,0	231,3	1,77	1,198	388,0	9,7	0,729
6,0	231,8	1,79	1,241	392,5	9,9	0,743
8,0	233,3	1,84	1,331	402,4	10,3	0,774
10,0	235,1	1,91	1,424	413,6	10,8	0,807
12,0	237,5	1,98	1,518	426,2	11,3	0,842
16,0	243,8	2,14	1,701	455,5	12,5	0,916
$T=600\text{ K}$						
0,1	251,7	1,67	1,002	433,6	10,3	0,667
1,0	252,3	1,68	1,022	436,3	10,4	0,673
2,0	253,0	1,70	1,043	439,4	10,6	0,680
3,0	253,7	1,71	1,065	442,7	10,7	0,687
4,0	254,6	1,73	1,087	446,2	10,9	0,694
5,0	255,4	1,75	1,109	449,9	11,0	0,702
6,0	256,4	1,77	1,130	453,7	11,2	0,709
8,0	258,4	1,80	1,173	461,7	11,6	0,724
10,0	260,7	1,85	1,215	470,5	11,9	0,740
12,0	263,3	1,89	1,256	479,8	12,3	0,755
16,0	269,2	1,99	1,332	500,4	13,1	0,787
20,0	276,1	2,11	1,397	523,4	14,0	0,819
$T=700\text{ K}$						
0,1	271,9	1,67	1,001	492,8	11,7	0,667
1,0	272,7	1,68	1,013	495,2	11,8	0,671
2,0	273,7	1,69	1,027	497,9	11,9	0,675
3,0	274,7	1,71	1,040	500,8	12,1	0,679
4,0	275,7	1,72	1,053	503,7	12,2	0,684
5,0	276,8	1,74	1,065	506,8	12,3	0,688
6,0	277,9	1,75	1,078	510,0	12,5	0,692
8,0	280,2	1,78	1,102	516,6	12,8	0,701
10,0	282,7	1,81	1,125	523,6	13,1	0,710
12,0	285,4	1,85	1,147	531,0	13,4	0,718
16,0	291,2	1,92	1,187	547,0	14,0	0,736
20,0	297,6	2,00	1,220	564,3	14,7	0,752
25,0	306,3	2,11	1,253	587,6	15,5	0,772
$T=800\text{ K}$						
0,1	290,7	1,67	1,001	548,2	13,0	0,667
1,0	291,6	1,68	1,009	550,3	13,1	0,669
2,0	292,7	1,69	1,017	552,6	13,2	0,672
3,0	293,8	1,70	1,025	555,1	13,3	0,675
4,0	295,0	1,71	1,033	557,6	13,5	0,678
5,0	296,2	1,73	1,041	560,2	13,6	0,680
6,0	297,4	1,74	1,049	562,9	13,7	0,683
8,0	299,8	1,77	1,064	568,4	13,9	0,688
10,0	302,4	1,79	1,078	574,2	14,2	0,694
12,0	305,1	1,82	1,090	580,3	14,4	0,699
16,0	310,8	1,88	1,113	593,2	15,0	0,709

Ксенон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	316,9	1,94	1,132	607,1	15,5	0,719
25,0	325,1	2,02	1,150	625,5	16,2	0,731
30,0	333,7	2,11	1,163	645,0	17,0	0,741
$T=900$ K						
0,1	308,3	1,67	1,001	600,4	14,3	0,667
1,0	309,3	1,68	1,006	602,3	14,4	0,668
2,0	310,5	1,69	1,011	604,3	14,5	0,670
3,0	311,7	1,70	1,016	606,4	14,6	0,672
4,0	312,9	1,71	1,022	608,6	14,7	0,674
5,0	314,1	1,72	1,027	610,8	14,8	0,676
6,0	315,4	1,73	1,032	613,1	14,9	0,677
8,0	317,9	1,75	1,041	617,9	15,1	0,681
10,0	320,5	1,78	1,049	622,8	15,3	0,684
12,0	323,2	1,80	1,057	627,9	15,5	0,688
16,0	328,9	1,85	1,071	638,7	16,0	0,694
20,0	334,7	1,90	1,082	650,1	16,5	0,700
25,0	342,4	1,97	1,092	665,3	17,1	0,707
30,0	350,4	2,04	1,098	681,3	17,7	0,714
35,0	358,7	2,11	1,101	698,0	18,3	0,720
$T=1000$ K						
0,1	325,0	1,67	1,000	650,0	15,4	0,667
1,0	326,1	1,68	1,004	651,6	15,5	0,668
5,0	331,0	1,71	1,017	659,1	15,9	0,673
10,0	337,4	1,77	1,031	669,5	16,4	0,678
20,0	351,3	1,87	1,050	692,8	17,4	0,689
30,0	366,3	1,99	1,057	719,2	18,5	0,697
40,0	382,0	2,11	1,056	747,7	19,6	0,705
$T=1100$ K						
0,1	340,8	1,67	1,000	697,3	16,6	0,667
1,0	341,9	1,68	1,002	698,8	16,6	0,667
5,0	346,9	1,71	1,011	705,4	17,0	0,671
10,0	353,3	1,76	1,019	714,4	17,4	0,674
20,0	366,9	1,85	1,029	734,7	18,3	0,681
30,0	381,2	1,95	1,031	757,5	19,3	0,686
40,0	396,2	2,05	1,026	782,1	20,3	0,691
$T=1200$ K						
0,1	356,0	1,67	1,000	742,7	17,6	0,667
1,0	357,1	1,67	1,001	744,0	17,7	0,667
5,0	362,1	1,71	1,006	749,9	18,0	0,669
10,0	368,4	1,75	1,011	757,9	18,4	0,672
20,0	381,7	1,83	1,014	775,8	19,3	0,676
30,0	395,5	1,92	1,012	795,7	20,2	0,679
40,0	409,8	2,01	1,005	817,3	21,1	0,682
50,0	424,3	2,10	0,995	840,0	22,0	0,684
$T=1300$ K						
0,1	370,5	1,67	1,000	786,4	18,7	0,667
1,0	371,6	1,67	1,001	787,5	18,7	0,667
5,0	376,6	1,70	1,003	792,8	19,0	0,668
10,0	382,9	1,74	1,005	800,0	19,4	0,670

Ксенон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	395,8	1,82	1,004	815,9	20,2	0,672
30,0	409,2	1,90	0,999	833,6	21,0	0,674
40,0	422,9	1,98	0,990	852,7	21,8	0,675
50,0	436,9	2,06	0,979	872,9	22,7	0,677

$T=1400$ K

0,1	384,5	1,67	1,000	828,6	19,7	0,667
1,0	385,6	1,67	1,000	829,6	19,7	0,667
5,0	390,5	1,70	1,001	834,4	20,0	0,668
10,0	396,7	1,73	1,000	840,9	20,4	0,668
20,0	409,4	1,81	0,996	855,1	21,1	0,669
30,0	422,4	1,88	0,989	871,0	21,8	0,670
40,0	435,7	1,95	0,980	888,1	22,6	0,671
50,0	449,0	2,02	0,968	906,1	23,4	0,671
60,0	462,5	2,09	0,955	924,9	24,2	0,671

$T=1500$ K

0,1	398,0	1,67	1,000	869,4	20,6	0,667
1,0	399,1	1,67	1,000	870,4	20,7	0,667
5,0	403,9	1,70	0,999	874,7	21,0	0,667
10,0	410,0	1,73	0,997	880,6	21,3	0,667
20,0	422,5	1,79	0,991	893,5	22,0	0,667
30,0	435,1	1,86	0,982	907,8	22,7	0,667
40,0	448,0	1,93	0,972	923,2	23,4	0,667
50,0	460,9	1,99	0,960	939,5	24,1	0,667
60,0	473,9	2,06	0,947	956,5	24,8	0,667

$T=1750$ K

0,1	429,9	1,67	1,000	966,7	23,0	0,667
1,0	430,9	1,67	0,999	967,5	23,0	0,667
5,0	435,6	1,69	0,996	970,9	23,2	0,666
10,0	441,4	1,72	0,992	975,6	23,5	0,666
20,0	453,3	1,77	0,982	985,8	24,1	0,664
30,0	465,2	1,83	0,971	997,0	24,7	0,663
40,0	477,2	1,88	0,960	1009,2	25,3	0,662
50,0	489,2	1,94	0,947	1022,1	25,9	0,660
60,0	501,2	1,99	0,935	1035,7	26,6	0,659
70,0	513,2	2,05	0,922	1049,8	27,2	0,658

$T=2000$ K

0,1	459,5	1,67	1,000	1058,2	25,1	0,667
1,0	460,6	1,67	0,999	1058,8	25,2	0,666
5,0	465,0	1,69	0,995	1061,6	25,4	0,666
10,0	470,7	1,71	0,990	1065,4	25,6	0,665
20,0	482,0	1,76	0,978	1073,6	26,1	0,662
30,0	493,3	1,81	0,966	1082,7	26,7	0,660
40,0	504,6	1,85	0,954	1092,5	27,2	0,658
50,0	515,9	1,90	0,942	1103,0	27,8	0,657
60,0	527,2	1,95	0,929	1114,1	28,3	0,655
70,0	538,4	1,99	0,917	1125,6	28,8	0,653
80,0	549,6	2,04	0,905	1137,5	29,4	0,652
90,0	560,7	2,08	0,892	1149,7	29,9	0,650

Ксенон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=2250\text{ K}$						
0,1	487,4	1,67	1,000	1145,1	27,2	0,667
1,0	488,4	1,67	0,999	1145,6	27,2	0,666
5,0	492,7	1,69	0,994	1147,9	27,4	0,665
10,0	498,1	1,71	0,988	1150,9	27,6	0,664
20,0	508,9	1,75	0,976	1157,6	28,1	0,662
30,0	519,7	1,79	0,964	1165,0	28,6	0,659
40,0	530,5	1,83	0,952	1173,1	29,1	0,657
50,0	541,2	1,87	0,940	1181,8	29,5	0,655
60,0	551,9	1,91	0,928	1190,9	30,0	0,652
70,0	562,6	1,95	0,916	1200,5	30,5	0,650
80,0	573,1	1,99	0,904	1210,4	31,0	0,649
90,0	583,6	2,03	0,892	1220,7	31,5	0,647
100,0	594,0	2,07	0,881	1231,2	32,0	0,645
$T=2500\text{ K}$						
0,1	513,8	1,67	1,000	1228,2	29,2	0,667
1,0	514,7	1,67	0,999	1228,6	29,2	0,666
5,0	518,9	1,69	0,994	1230,4	29,4	0,665
10,0	524,1	1,70	0,988	1232,9	29,6	0,664
20,0	534,4	1,74	0,976	1238,3	30,0	0,661
30,0	544,8	1,78	0,964	1244,5	30,4	0,658
40,0	555,1	1,81	0,952	1251,2	30,9	0,656
50,0	565,4	1,85	0,940	1258,4	31,3	0,653
60,0	575,6	1,89	0,928	1266,0	31,7	0,651
70,0	585,7	1,92	0,916	1274,1	32,2	0,649
80,0	595,8	1,96	0,905	1282,4	32,6	0,647
90,0	605,8	1,99	0,894	1291,1	33,0	0,645
100,0	615,7	2,02	0,883	1300,1	33,5	0,643
$T=2750\text{ K}$						
0,1	538,8	1,67	1,000	1308,0	31,1	0,667
1,0	539,7	1,67	0,999	1308,3	31,1	0,666
5,0	543,8	1,68	0,994	1309,8	31,2	0,665
10,0	548,8	1,70	0,988	1311,8	31,4	0,664
20,0	558,8	1,73	0,976	1316,3	31,8	0,661
30,0	568,7	1,77	0,964	1321,4	32,2	0,658
40,0	578,6	1,80	0,952	1326,9	32,6	0,655
50,0	588,5	1,83	0,940	1333,0	33,0	0,653
60,0	598,3	1,86	0,929	1339,4	33,4	0,651
70,0	608,0	1,90	0,918	1346,2	33,8	0,648
80,0	617,6	1,93	0,907	1353,3	34,2	0,646
90,0	627,2	1,96	0,896	1360,7	34,6	0,644
100,0	636,7	1,99	0,886	1368,4	35,0	0,642
120,0	655,5	2,05	0,866	1384,4	35,8	0,639
$T=3000\text{ K}$						
0,1	562,8	1,67	1,000	1385,0	32,9	0,667
1,0	563,7	1,67	0,999	1385,3	32,9	0,666
5,0	567,5	1,68	0,994	1386,5	33,1	0,665
10,0	572,4	1,70	0,988	1388,1	33,2	0,664
20,0	582,0	1,73	0,976	1391,8	33,6	0,661
30,0	591,6	1,76	0,965	1396,0	34,0	0,658

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
40,0	601,2	1,79	0,953	1400,6	34,3	0,655
50,0	610,7	1,82	0,942	1405,7	34,7	0,653
60,0	620,1	1,85	0,931	1411,1	35,0	0,650
70,0	629,5	1,88	0,920	1416,9	35,4	0,648
80,0	638,8	1,91	0,910	1423,0	35,8	0,646
90,0	648,0	1,93	0,899	1429,4	36,2	0,644
100,0	657,1	1,96	0,889	1436,0	36,5	0,642
120,0	675,2	2,02	0,870	1449,8	37,3	0,638

2.4. Неон

Для составления уравнения состояния неона обработаны экспериментальные данные, некоторые сведения о которых приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Экспериментальные исследования сжимаемости неона в газообразном состоянии

$\Delta T, K$	$\Delta p, MPa$	$\delta z, \%$	Авторы	Литература
273 — 673	2 — 10	0,079	Хольборн, Отто (1925)	[46]
273 — 373	3 — 45	0,05	Михельс, Гибсон (1928)	[47]
273 — 973	1 — 8	—	Никольсон, Шнейдер (1955)	[48]
273 — 423	2 — 290	0,05	Михельс, Вассенаар, Лау-эрс (1960)	[49]
300 — 720	10 — 50	0,15	Рабинович, Токина, Березин (1970)	[50]
65 — 273	1 — 25	0,025	Оносовский, Мороз (1970)	[51]

Примечание. Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных δz уравнением состояния вида (1.3) составляет 0,08%.

Параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6) определялись при обработке 222 опытных точек в области температур $T = 173 \div 723 K$ и плотностей $\rho = 0 \div 300 \text{ кг/м}^3$. Эта область на рис. 2.6 заштрихована.

В связи с тем, что неон имеет малую глубину потенциальной ямы, для составления уравнения состояния необходимо иметь приведенные вириальные коэффициенты в более широком интервале температур, чем для аргона и криптона. Значения второго вириального коэффициента B^* , приведенные в [1], аппроксимированы полиномом в интервале приведенных температур $T^* = 5 \div 70$. Учтен неаддитивный вклад в третий вириальный коэффициент. Поправка на неаддитивность ΔC_3^* суммировалась со значением аддитивного третьего вириального коэффициента. Полученный неаддитивный третий вириальный коэффициент аппроксимирован полиномом (2.2) в интервале $T^* = 1 \div 100$. На рис. 2.7 представлены третий аддитивный и третий неаддитивный вириальные коэффициенты неона. Неаддитивный третий вириальный коэффициент неона проходит ниже аддитивного, что связано с малой поляризуемостью неона $\alpha^* = 0,018$.

Для четвертого и пятого вириальных коэффициентов использована аппроксимация в интервале $T^* = 1 \div 20$, приведенная в § 2.1. Это допущение основано

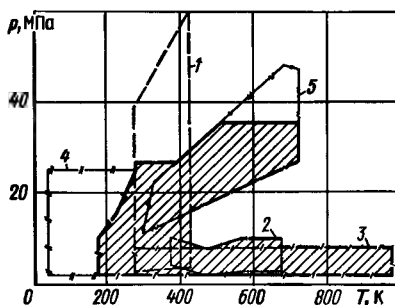


Рис. 2.6. Область обработки данных о сжимаемости газообразного неона:

1 [47, 49]; 2 [46]; 3—[48]; 4 [51]; 5—[50]

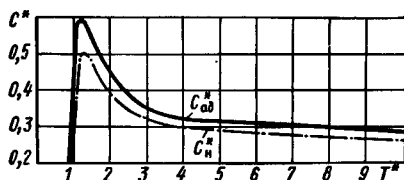


Рис. 2.7. Неаддитивный третий вириальный коэффициент неона $C_n^{\#}$

на том, что при $T^*=50$ вклады слагаемых $D^*b_0^3\rho^3$ и $E^*b_0^4\rho^4$ в значение сжимаемости по уравнению состояния (1.3) невелики, а графическая экстраполяция кривых $D^*(T^*)$ и $E^*(T^*)$ даст значения D^* и E^* , при $T^*=50$ достаточно хорошо совпадающие с результатами расчетной экстраполяции аппроксимирующих уравнений.

Константы уравнения состояния неона: $b_0=(1,3301\pm 0,0018)\cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\epsilon/k=(34,013\pm 0,150)$ К.

Как было отмечено выше, надежные параметры модельного потенциала можно получить только при наличии надежных экспериментальных данных. В настоящее время имеются хорошо отработанные методы определения равновесных свойств газов. Погрешность данных составляет 0,05—0,1%, поэтому использование их для расчетов параметров потенциалов оправдано. Экспериментальные данные о вязкости и теплопроводности получены со значительно меньшей точностью, поэтому проблеме отбора наиболее надежных данных должно быть уделено особое внимание.

Подробный анализ опытных данных о вязкости и теплопроводности неона при атмосферном давлении и ниже, полученных до 1972 г., показал, что существующие данные о теплопроводности согласуются между собой в пределах суммарной погрешности измерений и каких-либо аномалий не обнаруживают. Анализ результатов, полученных после 1972 г., подтверждает этот вывод. В связи с этим в массив экспериментальных данных о теплопроводности неона включены в основном данные, полученные в последние годы. Отобрано 108 экспериментальных точек: данные Варгафтика и Якуша [52], Саксены [53, 54, 55], Марченкова и Алейникова [56], Спрингера [57] и Нестерова и Судника [58], охватывающие область температур $T=300\div 2723$ К. Относительная погрешность всех данных принята равной 2%.

Критический анализ экспериментальных данных о вязкости неона низкой плотности показывает [33, 59], что имеются существенные систематические расхождения между данными, полученными Траутцем, и результатами Кестина [60, 61], Смита [62, 63] и Гувары [64]. Данные Кестина, Смита и Гувары получены различными методами и согласуются между собой в пределах 2,5%. Сравнение их с данными Траутца показывает, что при температурах до 700 К наблюдается хорошее согласование; при более высоких температурах данные Траутца систематически занижены, причем расхождения возрастают по мере увеличения температуры и достигают 4% при $T=1100$ К. Для исследования отобраны 57 экспериментальных значений вязкости неона низкой плотности: данные Кестина [60, 61], Смита [62, 63] и Гувары [64], охватывающие область температур $T=140\div 2100$ К. Относительная погрешность данных принята равной 1%.

Уравнения вязкости и теплопроводности газообразного неона низкой плотности находились в виде теоретически обоснованных уравнений (1.24) и

(1.27). Использованы те же значения констант аппроксимации интеграла столкновения, что и в § 2.1.

В совместную обработку включены также данные о неравновесных свойствах неона при повышенном давлении. Сюда относятся данные о вязкости неона при повышенном давлении, полученные Кестиным и Уайтлоу [65], Флином [66], Рабиновичем [33] и Слюсарем [68], и данные о теплопроводности Зенгерса [69], Тюфо [70], Голубева и Шпагиной [71] и Васильковской и Голубева [72] в интервале плотности $\rho = 0 \div 100 \text{ кг/м}^3$. Температурная область исследования вязкости $T = 200 \div 523 \text{ К}$ и теплопроводности $T = 150 \div 600 \text{ К}$; относительная погрешность $\delta\eta = 1\%$; $\delta\lambda = 2\%$.

Уравнения вязкости и теплопроводности неона умеренной плотности найдены в виде вязкостного и теплопроводностного вириальных уравнений (1.43) и (1.44).

Константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) определены при минимизации функционала (1.18). Обработано 222 экспериментальных значения сжимаемости, 108 значений теплопроводности низкой плотности, 175 значений теплопроводности умеренной плотности, а также соответственно 57 и 99 значений вязкости низкой и умеренной плотности.

Средние квадратические погрешности аппроксимации экспериментальных данных составили, %: $\delta z = 0,083$; $\delta\eta = 0,928$; $\delta\eta_0 = 1,040$; $\delta\eta^\infty = 0,868$; $\delta\lambda = 1,643$; $\delta\lambda_0 = 1,898$; $\delta\lambda^{-1} = 1,477$.

Таким образом, получены единые константы потенциала и согласованные уравнения сжимаемости, вязкости и теплопроводности неона низкой и умеренной плотности, описывающие экспериментальные данные о равновесных и неравновесных свойствах неона с точностью, соответствующей точности используемых опытных данных. Эти константы мало отличаются от тех, которые получены при обработке только данных о плотности.

С помощью этих уравнений, а также известных термодинамических соотношений (см. § 1.6) рассчитаны таблицы теплофизических свойств неона в широком интервале температур как в области существования экспериментальных данных, так и в области высоких температур и давлений, где опытных данных нет. В качестве верхней границы температурного интервала выбрана температура начала ионизации $T_* = 3000 \text{ К}$, в качестве нижней границы $T_n = 200 \text{ К}$, ниже которой начинают сказываться квантовые эффекты, не учитываемые в настоящей работе.

Область давления при расчете таблиц определяется предельной плотностью, при которой использовались экспериментальные данные о сжимаемости при низких температурах, $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$.

Идеально-газовые функции неона рассчитаны с помощью выражений

$$c_p^0/R = 2,5; (h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0)/(RT) = 2,5 + 0,23092460 \tau,$$

где $\Delta h_0^0 = 1920 \text{ Дж/моль}$ по данным [37].

Значение абсолютной энтропии в идеально-газовом состоянии (при $p_0 = 0,101326 \text{ МПа}$) рассчитано по уравнению

$$s^0/R = 17,5446555 + 2,5 \ln(T/293,15),$$

где $s_{293,15}^0/R = 17,5446555$ по данным [42].

В процессе обработки экспериментальных данных использованы следующие значения физических констант для неона:

масса моля $\mu = 20,183 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 0,411956 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$;

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 1920 \text{ Дж/моль}$;

единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $b_0 = (1,34029271 \pm \pm 0,06821) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $\epsilon/k = (34,8380839 \pm 0,00076) \text{ К}$.

Константы аппроксимирующих полиномов для второго и третьего приведенных вириальных коэффициентов:

$$\begin{aligned}
a_0 &= 4,04049261 \cdot 10^{-1} & c_0 &= 1,39652346 \cdot 10^{-1} \\
a_1 &= 8,511696860 \cdot 10^0 & c_1 &= 2,33525031 \cdot 10^0 \\
a_2 &= -2,09352973 \cdot 10^2 & c_2 &= -1,57905303 \cdot 10^1 \\
a_3 &= 2,43684895 \cdot 10^3 & c_3 &= 5,82309684 \cdot 10^1 \\
a_4 &= -1,62109696 \cdot 10^4 & c_4 &= -1,18478573 \cdot 10^2 \\
a_5 &= 5,61852361 \cdot 10^4 & c_5 &= 1,40105471 \cdot 10^2 \\
a_6 &= -7,85213672 \cdot 10^6 & c_6 &= -8,96378382 \cdot 10^1 \\
&& c_7 &= 2,33476534 \cdot 10^1
\end{aligned}$$

Константы аппроксимации остальных вириальных коэффициентов использовались те же, что и в § 2.1.

Результаты расчета теплофизических свойств неона приведены в табл. 2.12 и 2.13.

Таблица 2.12. Неон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=500 \text{ K}$						
0,1	0,49	1,0003	607,6	7,788	0,618	1,030
1,0	4,84	1,0033	608,1	6,839	0,618	1,031
2,0	9,65	1,0066	608,6	6,553	0,618	1,031
3,0	14,42	1,0099	609,2	6,386	0,619	1,032
4,0	19,17	1,0132	609,8	6,267	0,619	1,033
5,0	23,88	1,0165	610,3	6,175	0,619	1,033
6,0	28,57	1,0197	610,9	6,100	0,619	1,034
8,0	37,84	1,0263	612,0	5,981	0,620	1,035
10,0	47,00	1,0329	613,2	5,888	0,620	1,037
12,0	56,05	1,0394	614,3	5,813	0,621	1,038
16,0	73,80	1,0526	616,6	5,694	0,622	1,040
20,0	91,12	1,0656	618,9	5,601	0,623	1,043
25,0	112,18	1,0820	621,8	5,508	0,624	1,045
30,0	132,62	1,0982	624,8	5,432	0,625	1,048
35,0	152,47	1,1145	627,7	5,368	0,627	1,050
40,0	171,75	1,1307	630,6	5,312	0,628	1,052
45,0	190,50	1,1469	633,6	5,263	0,629	1,054
50,0	208,73	1,1630	636,6	5,218	0,630	1,056
60,0	243,75	1,1951	642,6	5,142	0,633	1,060
70,0	276,97	1,2270	648,6	5,077	0,635	1,063
$T=600 \text{ K}$						
0,1	0,40	1,0003	710,6	7,976	0,618	1,030
1,0	4,03	1,0028	711,1	7,027	0,618	1,030
2,0	8,05	1,0056	711,7	6,741	0,618	1,031
3,0	12,04	1,0084	712,4	6,574	0,619	1,031
4,0	16,00	1,0112	713,0	6,455	0,619	1,032
5,0	19,95	1,0141	713,6	6,363	0,619	1,032
6,0	23,87	1,0169	714,2	6,288	0,619	1,033
8,0	31,66	1,0225	715,5	6,169	0,620	1,034
10,0	39,35	1,0281	716,7	6,077	0,620	1,035
12,0	46,97	1,0336	718,0	6,002	0,621	1,035
16,0	61,96	1,0448	720,5	5,883	0,622	1,037
20,0	76,63	1,0559	723,0	5,791	0,623	1,039
25,0	94,55	1,0697	726,1	5,698	0,624	1,041

Heon

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
30,0	112,02	1,0835	729,2	5,623	0,625	1,043
35,0	129,05	1,0973	732,4	5,559	0,626	1,044
40,0	145,67	1,1109	735,5	5,503	0,627	1,046
45,0	161,89	1,1246	738,7	5,454	0,628	1,048
50,0	177,73	1,1382	741,8	5,410	0,629	1,049
60,0	208,33	1,1652	748,1	5,334	0,631	1,052
70,0	237,58	1,1921	754,4	5,270	0,634	1,055
80,0	265,58	1,2187	760,8	5,214	0,636	1,057
90,0	292,42	1,2452	767,1	5,165	0,638	1,059

$T=700$ K

0,1	0,35	1,0002	813,6	8,134	0,618	1,030
1,0	3,46	1,0024	814,2	7,186	0,618	1,030
2,0	6,90	1,0049	814,8	6,900	0,618	1,031
3,0	10,33	1,0073	815,5	6,733	0,619	1,031
4,0	13,74	1,0098	816,1	6,614	0,619	1,031
5,0	17,13	1,0122	816,8	6,522	0,619	1,032
6,0	20,51	1,0146	817,5	6,447	0,619	1,032
8,0	27,21	1,0195	818,8	6,329	0,620	1,033
10,0	33,85	1,0243	820,1	6,237	0,620	1,033
12,0	40,43	1,0292	821,4	6,161	0,621	1,034
16,0	53,41	1,0388	824,1	6,043	0,622	1,035
20,0	66,15	1,0485	826,7	5,951	0,622	1,036
25,0	81,76	1,0604	830,0	5,858	0,623	1,038
30,0	97,01	1,0724	833,3	5,783	0,625	1,039
35,0	111,94	1,0842	836,6	5,719	0,626	1,041
40,0	126,56	1,0961	839,9	5,664	0,627	1,042
45,0	140,86	1,1079	843,2	5,615	0,628	1,043
50,0	154,87	1,1196	846,5	5,572	0,629	1,044
60,0	182,05	1,1429	853,0	5,496	0,631	1,047
70,0	208,17	1,1661	859,6	5,432	0,633	1,049
80,0	233,32	1,1891	866,1	5,377	0,635	1,051
90,0	257,54	1,2119	872,6	5,328	0,636	1,053
100,0	280,90	1,2345	879,1	5,284	0,638	1,054

$T=800$ K

0,1	0,30	1,0002	916,6	8,272	0,618	1,030
1,0	3,03	1,0021	917,2	7,323	0,618	1,030
2,0	6,04	1,0043	917,9	7,038	0,618	1,030
3,0	9,04	1,0064	918,6	6,871	0,619	1,031
4,0	12,03	1,0086	919,2	6,752	0,619	1,031
5,0	15,01	1,0107	919,9	6,660	0,619	1,031
6,0	17,97	1,0129	920,6	6,585	0,619	1,031
8,0	23,87	1,0171	922,0	6,467	0,620	1,032
10,0	29,71	1,0214	923,4	6,375	0,620	1,032
12,0	35,50	1,0257	924,8	6,299	0,620	1,033
16,0	46,95	1,0342	927,5	6,181	0,621	1,034
20,0	58,21	1,0426	930,3	6,089	0,622	1,035
25,0	72,03	1,0531	933,7	5,997	0,623	1,036
30,0	85,58	1,0636	937,1	5,922	0,624	1,037
35,0	98,88	1,0741	940,5	5,858	0,625	1,038
40,0	111,92	1,0845	943,9	5,803	0,626	1,039
45,0	124,72	1,0948	947,3	5,754	0,627	1,040

Heon

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
50,0	137,29	1,1051	950,7	5,711	0,628	1,041
60,0	161,74	1,1256	957,5	5,635	0,630	1,042
70,0	185,35	1,1460	964,2	5,572	0,631	1,044
80,0	208,16	1,1661	970,9	5,517	0,633	1,046
90,0	230,23	1,1862	977,6	5,468	0,635	1,047
100,0	251,59	1,2061	984,3	5,424	0,636	1,049
120,0	292,36	1,2455	997,5	5,349	0,640	1,052

 $T=900$ K

0,1	0,27	1,0002	1019,5	8,393	0,618	1,030
1,0	2,69	1,0019	1020,2	7,445	0,618	1,030
2,0	5,37	1,0038	1020,9	7,159	0,618	1,030
3,0	8,05	1,0057	1021,6	6,992	0,618	1,030
4,0	10,71	1,0076	1022,3	6,874	0,619	1,031
5,0	13,36	1,0095	1023,0	6,782	0,619	1,031
6,0	16,00	1,0114	1023,7	6,707	0,619	1,031
8,0	21,25	1,0153	1025,2	6,588	0,619	1,031
10,0	26,47	1,0190	1026,6	6,496	0,620	1,032
12,0	31,64	1,0228	1028,0	6,421	0,620	1,032
16,0	41,88	1,0304	1030,8	6,303	0,621	1,033
20,0	51,97	1,0379	1033,7	6,211	0,622	1,033
25,0	64,39	1,0473	1037,2	6,119	0,622	1,034
30,0	76,58	1,0566	1040,7	6,044	0,623	1,035
35,0	88,56	1,0659	1044,2	5,980	0,624	1,036
40,0	100,35	1,0752	1047,7	5,925	0,625	1,036
45,0	111,93	1,0844	1051,2	5,877	0,626	1,037
50,0	123,32	1,0936	1054,7	5,833	0,627	1,038
60,0	145,56	1,1118	1061,6	5,758	0,628	1,039
70,0	167,09	1,1299	1068,5	5,695	0,630	1,041
80,0	187,98	1,1479	1075,3	5,640	0,631	1,042
90,0	208,24	1,1657	1082,1	5,591	0,633	1,043
100,0	227,91	1,1835	1088,9	5,548	0,634	1,044
120,0	265,62	1,2185	1102,4	5,472	0,637	1,046

 $T=1000$ K

0,1	0,24	1,0002	1122,5	8,502	0,618	1,030
1,0	2,42	1,0017	1123,2	7,553	0,618	1,030
5,0	12,03	1,0086	1126,1	6,890	0,619	1,030
10,0	23,87	1,0171	1129,7	6,605	0,620	1,031
20,0	46,95	1,0341	1136,9	6,319	0,621	1,032
30,0	69,30	1,0509	1144,1	6,153	0,623	1,033
40,0	90,95	1,0676	1151,2	6,034	0,624	1,035
50,0	111,96	1,0841	1158,3	5,942	0,626	1,036
60,0	132,34	1,1005	1165,4	5,867	0,627	1,037
70,0	152,15	1,1168	1172,4	5,804	0,629	1,038
80,0	171,40	1,1330	1179,3	5,749	0,630	1,039
90,0	190,13	1,1491	1186,3	5,701	0,631	1,040
100,0	208,36	1,1650	1193,2	5,657	0,633	1,040
120,0	243,43	1,1966	1206,8	5,582	0,635	1,042
140,0	276,78	1,2278	1220,4	5,519	0,638	1,044

 $T=1100$ K

0,1	0,22	1,0002	1225,5	8,600	0,618	1,030
1,0	2,20	1,0016	1226,2	7,651	0,618	1,030

Heon

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
5,0	10,95	1,0078	1229,1	6,988	0,619	1,030
10,0	21,73	1,0155	1232,8	6,703	0,619	1,031
20,0	42,81	1,0309	1240,1	6,418	0,621	1,032
30,0	63,28	1,0461	1247,4	6,251	0,622	1,032
40,0	83,18	1,0613	1254,6	6,133	0,623	1,033
50,0	102,52	1,0763	1261,8	6,041	0,625	1,034
60,0	121,34	1,0912	1268,9	5,966	0,626	1,035
70,0	139,67	1,1060	1276,0	5,903	0,627	1,035
80,0	157,53	1,1207	1283,1	5,848	0,628	1,036
90,0	174,95	1,1353	1290,1	5,800	0,630	1,037
100,0	191,93	1,1498	1297,1	5,756	0,631	1,037
120,0	224,70	1,1785	1310,9	5,682	0,633	1,039
140,0	255,99	1,2069	1324,6	5,618	0,635	1,040
160,0	285,92	1,2349	1338,2	5,564	0,637	1,041

$T=1200$ K

0,1	0,20	1,0001	1328,5	8,689	0,618	1,030
1,0	2,02	1,0014	1329,2	7,741	0,618	1,030
5,0	10,04	1,0071	1332,2	7,078	0,619	1,030
10,0	19,95	1,0141	1335,9	6,793	0,619	1,030
20,0	39,35	1,0282	1343,2	6,507	0,620	1,031
30,0	58,23	1,0421	1350,6	6,341	0,622	1,031
40,0	76,63	1,0559	1357,9	6,223	0,623	1,032
50,0	94,56	1,0697	1365,1	6,131	0,624	1,033
60,0	112,04	1,0833	1372,3	6,056	0,625	1,033
70,0	129,10	1,0968	1379,5	5,993	0,626	1,034
80,0	145,76	1,1103	1386,6	5,938	0,627	1,034
90,0	162,03	1,1236	1393,6	5,890	0,628	1,035
100,0	177,93	1,1369	1400,7	5,847	0,629	1,035
120,0	208,68	1,1632	1414,6	5,772	0,631	1,036
140,0	238,14	1,1892	1428,5	5,709	0,633	1,037
160,0	266,40	1,2150	1442,2	5,654	0,635	1,038
180,0	293,55	1,2404	1455,7	5,606	0,637	1,039

$T=1300$ K

0,1	0,19	1,0001	1431,5	8,772	0,618	1,030
1,0	1,86	1,0013	1432,2	7,823	0,618	1,030
5,0	9,28	1,0065	1435,2	7,161	0,618	1,030
10,0	18,43	1,0130	1438,9	6,875	0,619	1,030
20,0	36,40	1,0259	1446,3	6,590	0,620	1,030
30,0	53,93	1,0387	1453,7	6,423	0,621	1,031
40,0	71,04	1,0514	1461,0	6,305	0,622	1,031
50,0	87,75	1,0640	1468,3	6,214	0,623	1,031
60,0	104,07	1,0766	1475,5	6,139	0,624	1,032
70,0	120,02	1,0890	1482,7	6,076	0,625	1,032
80,0	135,63	1,1014	1489,9	6,021	0,626	1,033
90,0	150,89	1,1137	1497,0	5,973	0,627	1,033
100,0	165,84	1,1260	1504,1	5,929	0,628	1,033
120,0	194,81	1,1502	1518,1	5,855	0,629	1,034
140,0	222,63	1,1742	1532,0	5,792	0,631	1,035
160,0	249,40	1,1979	1545,8	5,737	0,633	1,035
180,0	275,18	1,2214	1559,5	5,689	0,634	1,036

Heon

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=1400\text{ K}$						
0,1	0,17	1,0001	1534,5	8,848	0,618	1,030
1,0	1,73	1,0012	1535,2	7,900	0,618	1,030
5,0	8,62	1,0060	1538,2	7,237	0,618	1,030
10,0	17,13	1,0120	1541,9	6,952	0,619	1,030
20,0	33,87	1,0239	1549,3	6,666	0,620	1,030
30,0	50,22	1,0357	1556,7	6,500	0,621	1,030
40,0	66,21	1,0475	1564,1	6,382	0,622	1,030
50,0	81,85	1,0592	1571,4	6,290	0,622	1,031
60,0	97,16	1,0708	1578,7	6,215	0,623	1,031
70,0	112,14	1,0823	1585,9	6,152	0,624	1,031
80,0	126,82	1,0938	1593,1	6,097	0,625	1,031
90,0	141,20	1,1052	1600,2	6,049	0,626	1,032
100,0	155,29	1,1165	1607,3	6,006	0,627	1,032
120,0	182,67	1,1390	1621,4	5,931	0,628	1,032
140,0	209,04	1,1613	1635,4	5,868	0,630	1,033
160,0	234,46	1,1833	1649,3	5,814	0,631	1,033
180,0	258,99	1,2051	1663,0	5,766	0,632	1,034
200,0	282,71	1,2267	1676,6	5,722	0,634	1,034
$T=1500\text{ K}$						
0,1	0,16	1,0001	1637,5	8,919	0,618	1,030
1,0	1,62	1,0011	1638,1	7,971	0,618	1,030
5,0	8,05	1,0056	1641,1	7,308	0,618	1,030
10,0	16,01	1,0111	1644,9	7,023	0,619	1,030
20,0	31,66	1,0222	1652,3	6,737	0,620	1,030
30,0	46,99	1,0332	1659,8	6,571	0,620	1,030
40,0	62,00	1,0441	1667,1	6,453	0,621	1,030
50,0	76,70	1,0550	1674,4	6,361	0,622	1,030
60,0	91,11	1,0658	1681,7	6,286	0,623	1,030
70,0	105,23	1,0765	1689,0	6,223	0,623	1,030
80,0	119,09	1,0872	1696,2	6,168	0,624	1,030
90,0	132,68	1,0978	1703,3	6,120	0,625	1,031
100,0	146,01	1,1083	1710,5	6,077	0,625	1,031
120,0	171,97	1,1293	1724,6	6,002	0,627	1,031
140,0	197,01	1,1500	1738,6	5,939	0,628	1,031
160,0	221,21	1,1705	1752,5	5,885	0,629	1,032
180,0	244,62	1,1908	1766,3	5,837	0,631	1,032
200,0	267,28	1,2110	1779,9	5,794	0,632	1,032
220,0	289,24	1,2309	1793,4	5,755	0,633	1,033
$T=1750\text{ K}$						
0,1	0,14	1,0001	1894,9	9,078	0,618	1,030
1,0	1,39	1,0009	1895,6	8,129	0,618	1,030
5,0	6,90	1,0047	1898,6	7,467	0,618	1,030
10,0	13,74	1,0094	1902,3	7,181	0,619	1,030
20,0	27,23	1,0188	1909,8	6,896	0,619	1,030
30,0	40,48	1,0281	1917,2	6,729	0,620	1,029
40,0	53,49	1,0373	1924,5	6,611	0,620	1,029
50,0	66,27	1,0465	1931,8	6,520	0,621	1,029
60,0	78,84	1,0557	1939,1	6,445	0,621	1,029
70,0	91,19	1,0648	1946,3	6,382	0,622	1,029
80,0	103,34	1,0739	1953,6	6,327	0,622	1,029
90,0	115,29	1,0829	1960,7	6,279	0,623	1,029

Неон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
100,0	127,04	1,0919	1967,9	6,236	0,623	1,029
120,0	150,00	1,1097	1982,0	6,161	0,624	1,029
140,0	172,26	1,1274	1996,1	6,098	0,625	1,029
160,0	193,85	1,1449	2010,0	6,044	0,626	1,029
180,0	214,83	1,1623	2023,8	5,996	0,627	1,029
200,0	235,21	1,1795	2037,5	5,953	0,628	1,029
220,0	255,04	1,1966	2051,1	5,914	0,629	1,029
240,0	274,34	1,2135	2064,6	5,878	0,630	1,029
260,0	293,13	1,2303	2078,0	5,846	0,631	1,029

$T=2000\text{ K}$

0,1	0,12	1,0001	2152,4	9,216	0,618	1,030
1,0	1,21	1,0008	2153,1	8,267	0,618	1,030
5,0	6,04	1,0041	2156,0	7,604	0,618	1,030
10,0	12,04	1,0081	2159,7	7,319	0,618	1,030
20,0	23,89	1,0162	2167,1	7,034	0,619	1,029
30,0	35,55	1,0242	2174,5	6,867	0,619	1,029
40,0	47,03	1,0322	2181,8	6,749	0,620	1,029
50,0	58,34	1,0402	2189,0	6,657	0,620	1,029
60,0	69,48	1,0481	2196,3	6,582	0,620	1,028
70,0	80,45	1,0560	2203,5	6,519	0,621	1,028
80,0	91,27	1,0639	2210,7	6,464	0,621	1,028
90,0	101,92	1,0717	2217,8	6,416	0,622	1,028
100,0	112,43	1,0795	2224,9	6,373	0,622	1,028
120,0	133,01	1,0950	2239,1	6,298	0,623	1,028
140,0	153,03	1,1104	2253,1	6,235	0,624	1,027
160,0	172,52	1,1257	2267,0	6,181	0,624	1,027
180,0	191,51	1,1408	2280,8	6,133	0,625	1,027
200,0	210,02	1,1558	2294,5	6,090	0,626	1,027
220,0	228,08	1,1707	2308,1	6,051	0,626	1,027
240,0	245,71	1,1855	2321,6	6,016	0,627	1,027
260,0	262,93	1,2002	2335,0	5,983	0,628	1,027
280,0	279,75	1,2148	2348,4	5,953	0,628	1,027
300,0	296,20	1,2293	2361,6	5,925	0,629	1,027

$T=2250\text{ K}$

0,1	0,11	1,0001	2409,9	9,337	0,618	1,030
1,0	1,08	1,0007	2410,5	8,388	0,618	1,030
5,0	5,38	1,0036	2413,5	7,725	0,618	1,030
10,0	10,71	1,0071	2417,1	7,440	0,618	1,030
20,0	21,28	1,0142	2424,4	7,155	0,619	1,029
30,0	31,69	1,0213	2431,7	6,988	0,619	1,029
40,0	41,97	1,0283	2439,0	6,870	0,619	1,029
50,0	52,10	1,0353	2446,2	6,778	0,620	1,028
60,0	62,10	1,0423	2453,4	6,703	0,620	1,028
70,0	71,97	1,0493	2460,5	6,640	0,620	1,028
80,0	81,72	1,0562	2467,7	6,585	0,620	1,028
90,0	91,33	1,0631	2474,8	6,537	0,621	1,028
100,0	100,83	1,0700	2481,8	6,494	0,621	1,027
120,0	119,7	1,0837	2495,9	6,419	0,622	1,027
140,0	137,66	1,0972	2509,9	6,356	0,622	1,027
160,0	155,41	1,1107	2523,7	6,302	0,623	1,027
180,0	172,76	1,1241	2537,5	6,254	0,623	1,026
200,0	189,71	1,1374	2551,1	6,211	0,624	1,026

Heon

<i>p</i>	<i>p</i>	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
220,0	206,28	1,1506	2564,7	6,172	0,624	1,026
240,0	222,50	1,1638	2578,2	6,136	0,625	1,026
260,0	238,37	1,1768	2591,6	6,104	0,625	1,026
280,0	253,91	1,1898	2604,9	6,074	0,626	1,026
300,0	269,13	1,2026	2618,2	6,045	0,626	1,026

T=2500 K

0,1	0,10	1,0001	2667,3	9,445	0,618	1,030
1,0	0,97	1,0006	2668,0	8,497	0,618	1,030
5,0	4,84	1,0032	2670,9	7,834	0,618	1,030
10,0	9,65	1,0063	2674,5	7,549	0,618	1,030
20,0	19,18	1,0127	2681,8	7,263	0,618	1,029
30,0	28,59	1,0189	2689,0	7,097	0,619	1,029
40,0	37,88	1,0252	2696,1	6,978	0,619	1,029
50,0	47,07	1,0315	2703,3	6,887	0,619	1,028
60,0	56,14	1,0377	2710,4	6,812	0,619	1,028
70,0	65,11	1,0439	2717,5	6,749	0,620	1,028
80,0	73,97	1,0501	2724,6	6,694	0,620	1,028
90,0	82,74	1,0563	2731,6	6,645	0,620	1,027
100,0	91,40	1,0624	2738,7	6,602	0,620	1,027
120,0	108,43	1,0746	2752,6	6,528	0,621	1,027
140,0	125,09	1,0868	2766,5	6,465	0,621	1,026
160,0	141,38	1,0988	2780,3	6,410	0,622	1,026
180,0	157,34	1,1108	2794,0	6,362	0,622	1,026
200,0	172,97	1,1227	2807,6	6,319	0,623	1,026
220,0	188,28	1,1346	2821,1	6,280	0,623	1,025
240,0	203,28	1,1464	2834,6	6,244	0,623	1,025
260,0	218,00	1,1581	2847,9	6,212	0,624	1,025
280,0	232,43	1,1697	2861,2	6,182	0,624	1,025
300,0	246,59	1,1813	2874,4	6,153	0,625	1,025
350,0	280,87	1,2100	2907,1	6,091	0,626	1,024

T=2750 K

0,1	0,09	1,0001	2924,8	9,544	0,618	1,030
1,0	0,88	1,0006	2925,5	8,595	0,618	1,030
5,0	4,40	1,0029	2928,3	7,932	0,618	1,030
10,0	8,78	1,0057	2931,9	7,647	0,618	1,030
20,0	17,46	1,0114	2939,1	7,361	0,618	1,029
30,0	26,04	1,0171	2946,2	7,195	0,619	1,029
40,0	34,52	1,0227	2953,3	7,076	0,619	1,029
50,0	42,92	1,0283	2960,4	6,985	0,619	1,028
60,0	51,22	1,0339	2967,5	6,910	0,619	1,028
70,0	59,44	1,0395	2974,5	6,846	0,619	1,028
80,0	67,57	1,0451	2981,5	6,792	0,620	1,028
90,0	75,61	1,0507	2988,5	6,743	0,620	1,027
100,0	83,57	1,0562	2995,5	6,700	0,620	1,027
120,0	99,25	1,0673	3009,3	6,626	0,620	1,027
140,0	114,61	1,0782	3023,1	6,562	0,621	1,026
160,0	129,67	1,0892	3036,8	6,508	0,621	1,026
180,0	144,44	1,1000	3050,4	6,460	0,621	1,026
200,0	158,93	1,1108	3064,0	6,417	0,622	1,025
220,0	173,15	1,1215	3077,4	6,378	0,622	1,025
240,0	187,12	1,1322	3090,8	6,342	0,622	1,025
260,0	200,83	1,1428	3104,1	6,309	0,623	1,025

Неон

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
280,0	214,29	1,1534	3117,4	6,279	0,623	1,025
300,0	227,53	1,1639	3130,6	6,251	0,623	1,024
350,0	259,64	1,1899	3163,2	6,188	0,624	1,024
400,0	290,46	1,2156	3195,4	6,134	0,625	1,024
$T = 3000 \text{ K}$						
0,1	0,08	1,0001	3182,3	9,633	0,618	1,030
1,0	0,81	1,0005	3182,9	8,685	0,618	1,030
5,0	4,04	1,0026	3185,8	8,022	0,618	1,030
10,0	8,05	1,0052	3189,3	7,736	0,618	1,030
20,0	16,02	1,0103	3196,4	7,451	0,618	1,029
30,0	23,90	1,0155	3203,5	7,284	0,618	1,029
40,0	31,71	1,0206	3210,5	7,166	0,619	1,029
50,0	39,44	1,0257	3217,5	7,074	0,619	1,028
60,0	47,10	1,0309	3224,5	6,999	0,619	1,028
70,0	54,68	1,0359	3231,5	6,936	0,619	1,028
80,0	62,18	1,0410	3238,4	6,881	0,619	1,028
90,0	69,62	1,0461	3245,4	6,833	0,619	1,027
100,0	76,98	1,0511	3252,3	6,790	0,620	1,027
120,0	91,50	1,0612	3266,0	6,715	0,620	1,027
140,0	105,75	1,0712	3279,7	6,652	0,620	1,026
160,0	119,75	1,0811	3293,3	6,597	0,620	1,026
180,0	133,49	1,0910	3306,9	6,549	0,621	1,026
200,0	147,00	1,1009	3320,3	6,506	0,621	1,025
220,0	160,27	1,1107	3333,7	6,467	0,621	1,025
240,0	173,32	1,1204	3347,1	6,431	0,622	1,025
260,0	186,15	1,1301	3360,3	6,399	0,622	1,025
280,0	198,78	1,1398	3373,5	6,368	0,622	1,024
300,0	211,19	1,1494	3386,6	6,340	0,622	1,024
350,0	241,39	1,1732	3419,1	6,277	0,623	1,024
400,0	270,44	1,1968	3451,3	6,223	0,624	1,023

Таблица 2.13. Неон

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T = 500 \text{ K}$						
0,1	586,1	1,67	1,000	448,7	69,6	0,664
1,0	587,9	1,67	0,997	448,8	69,7	0,663
2,0	589,9	1,68	0,995	448,9	69,9	0,663
3,0	591,9	1,68	0,992	449,0	70,0	0,662
4,0	593,9	1,69	0,989	449,1	70,1	0,661
5,0	595,9	1,70	0,986	449,2	70,3	0,661
6,0	597,9	1,70	0,984	449,3	70,4	0,660
8,0	601,9	1,71	0,978	449,6	70,7	0,658
10,0	605,9	1,73	0,973	449,9	71,0	0,657
12,0	609,9	1,74	0,968	450,2	71,3	0,656
16,0	617,7	1,76	0,957	451,0	71,8	0,653
20,0	625,6	1,78	0,947	451,9	72,4	0,650
25,0	635,3	1,81	0,935	453,1	73,2	0,647
30,0	644,9	1,84	0,922	454,5	73,9	0,644

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
35,0	654,5	1,87	0,910	456,0	74,7	0,641
40,0	664,0	1,89	0,898	457,6	75,4	0,639
45,0	673,4	1,92	0,887	459,4	76,2	0,636
50,0	682,7	1,95	0,875	461,2	76,9	0,633
60,0	701,1	2,00	0,854	465,2	78,5	0,628
70,0	719,1	2,05	0,833	469,4	80,0	0,624
$T=600$ K						
0,1	642,0	1,67	1,000	504,9	78,3	0,664
1,0	643,7	1,67	0,997	504,9	78,4	0,663
2,0	645,5	1,68	0,995	504,9	78,5	0,663
3,0	647,3	1,68	0,993	505,0	78,7	0,662
4,0	649,1	1,69	0,990	505,0	78,8	0,662
5,0	651,0	1,69	0,988	505,0	78,9	0,661
6,0	652,8	1,70	0,985	505,1	79,0	0,660
8,0	656,4	1,70	0,980	505,2	79,2	0,659
10,0	660,0	1,71	0,975	505,4	79,5	0,658
12,0	663,6	1,72	0,971	505,5	79,7	0,657
16,0	670,8	1,74	0,961	505,9	80,2	0,654
20,0	677,9	1,76	0,952	506,4	80,7	0,652
25,0	686,7	1,78	0,941	507,2	81,3	0,649
30,0	695,4	1,81	0,930	508,0	81,9	0,646
35,0	704,1	1,83	0,919	509,0	82,6	0,644
40,0	712,7	1,85	0,908	510,1	83,2	0,641
45,0	721,2	1,87	0,898	511,2	83,9	0,639
50,0	729,7	1,89	0,888	512,5	84,5	0,636
60,0	746,4	1,93	0,869	515,2	85,8	0,632
70,0	762,8	1,97	0,850	518,2	87,1	0,628
80,0	778,9	2,01	0,832	521,4	88,4	0,624
90,0	794,8	2,05	0,816	524,8	89,7	0,620
$T=700$ K						
0,1	693,4	1,67	1,000	557,4	86,5	0,664
1,0	694,9	1,67	0,998	557,4	86,5	0,663
2,0	696,6	1,67	0,995	557,4	86,6	0,663
3,0	698,3	1,68	0,993	557,4	86,8	0,662
4,0	700,0	1,68	0,991	557,4	86,9	0,662
5,0	701,6	1,69	0,989	557,4	87,0	0,661
6,0	703,3	1,69	0,986	557,4	87,1	0,661
8,0	706,6	1,70	0,982	557,4	87,3	0,660
10,0	709,9	1,71	0,978	557,4	87,5	0,658
12,0	713,2	1,71	0,973	557,5	87,7	0,657
16,0	719,8	1,73	0,965	557,7	88,1	0,655
20,0	726,3	1,74	0,956	557,9	88,5	0,653
25,0	734,4	1,76	0,946	558,3	89,1	0,651
30,0	742,5	1,78	0,936	558,8	89,6	0,648
35,0	750,4	1,80	0,926	559,4	90,2	0,646
40,0	758,3	1,82	0,917	560,1	90,7	0,643
45,0	766,2	1,84	0,907	560,9	91,3	0,641
50,0	773,9	1,86	0,898	561,7	91,8	0,639
60,0	789,3	1,89	0,881	563,6	92,9	0,635
70,0	804,4	1,92	0,864	565,7	94,1	0,631
80,0	819,3	1,96	0,848	568,1	95,2	0,627
90,0	834,0	1,99	0,832	570,6	96,3	0,624
100,0	848,4	2,02	0,818	573,3	97,4	0,620

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

№

$T=800$ K

0,1	741,3	1,67	1,000	607,2	94,2	0,664
1,0	742,7	1,67	0,998	607,1	94,3	0,664
2,0	744,2	1,67	0,996	607,1	94,3	0,663
3,0	745,8	1,68	0,994	607,1	94,4	0,663
4,0	747,3	1,68	0,992	607,0	94,5	0,662
5,0	748,9	1,68	0,990	607,0	94,6	0,661
6,0	750,4	1,69	0,988	607,0	94,7	0,661
8,0	753,5	1,69	0,984	606,9	94,9	0,660
10,0	756,5	1,70	0,980	606,9	95,1	0,659
12,0	759,6	1,71	0,976	606,9	95,3	0,658
16,0	765,7	1,72	0,968	606,9	95,6	0,656
20,0	771,8	1,73	0,960	607,0	96,0	0,654
25,0	779,3	1,75	0,951	607,2	96,5	0,652
30,0	786,7	1,77	0,942	607,4	97,0	0,650
35,0	794,1	1,78	0,933	607,8	97,4	0,647
40,0	801,4	1,80	0,924	608,2	97,9	0,645
45,0	808,7	1,81	0,915	608,7	98,4	0,643
50,0	815,9	1,83	0,907	609,2	98,9	0,641
60,0	830,2	1,86	0,891	610,5	99,9	0,637
70,0	844,3	1,89	0,875	612,0	100,9	0,633
80,0	858,2	1,92	0,861	613,7	101,9	0,630
90,0	871,9	1,94	0,846	615,6	102,9	0,627
100,0	885,4	1,97	0,833	617,6	103,9	0,623
120,0	911,8	2,03	0,807	622,1	105,9	0,618

$T=900$ K

0,1	786,2	1,67	1,000	654,8	101,6	0,664
1,0	787,5	1,67	0,998	654,8	101,6	0,664
2,0	789,0	1,67	0,996	654,7	101,7	0,663
3,0	790,4	1,68	0,994	654,6	101,8	0,663
4,0	791,9	1,68	0,992	654,6	101,9	0,662
5,0	793,3	1,68	0,990	654,5	102,0	0,662
6,0	794,8	1,68	0,989	654,5	102,0	0,661
8,0	797,6	1,69	0,985	654,4	102,2	0,660
10,0	800,5	1,70	0,981	654,3	102,4	0,659
12,0	803,4	1,70	0,978	654,3	102,5	0,658
16,0	809,0	1,71	0,970	654,2	102,9	0,657
20,0	814,7	1,72	0,963	654,1	103,2	0,655
25,0	821,7	1,74	0,955	654,2	103,6	0,653
30,0	828,7	1,75	0,946	654,2	104,1	0,651
35,0	835,6	1,77	0,938	654,4	104,5	0,649
40,0	842,4	1,78	0,930	654,6	104,9	0,647
45,0	849,3	1,79	0,922	654,9	105,4	0,645
50,0	856,0	1,81	0,914	655,3	105,8	0,643
60,0	869,4	1,83	0,899	656,1	106,7	0,639
70,0	882,6	1,86	0,885	657,1	107,6	0,636
80,0	895,7	1,89	0,871	658,4	108,5	0,632
90,0	908,6	1,91	0,858	659,8	109,4	0,629
100,0	921,3	1,93	0,846	661,3	110,3	0,626
120,0	946,2	1,98	0,822	664,7	112,1	0,620

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=1000\text{ K}$						
0,1	828,7	1,67	1,000	700,8	108,7	0,664
1,0	830,0	1,67	0,998	700,7	108,8	0,664
5,0	835,4	1,68	0,991	700,4	109,1	0,662
10,0	842,1	1,69	0,983	700,1	109,4	0,660
20,0	855,5	1,72	0,966	699,7	110,2	0,656
30,0	868,6	1,74	0,950	699,6	111,0	0,652
40,0	881,6	1,77	0,935	699,7	111,7	0,648
50,0	894,4	1,79	0,921	700,0	112,5	0,644
60,0	907,1	1,81	0,907	700,6	113,4	0,641
70,0	919,6	1,84	0,894	701,3	114,2	0,637
80,0	931,9	1,86	0,881	702,1	115,0	0,634
90,0	944,1	1,88	0,869	703,1	115,8	0,631
100,0	956,2	1,90	0,857	704,3	116,6	0,628
120,0	979,9	1,95	0,834	706,9	118,3	0,623
140,0	1003,0	1,99	0,813	710,0	120,0	0,618
$T=1100\text{ K}$						
0,1	869,2	1,67	1,000	745,3	115,6	0,664
1,0	870,3	1,67	0,998	745,2	115,7	0,664
5,0	875,5	1,68	0,992	744,9	115,9	0,662
10,0	881,8	1,69	0,984	744,5	116,3	0,660
20,0	894,4	1,71	0,969	744,0	117,0	0,656
30,0	906,9	1,74	0,954	743,7	117,7	0,652
40,0	919,2	1,76	0,940	743,6	118,4	0,649
50,0	931,4	1,78	0,927	743,7	119,1	0,645
60,0	943,4	1,80	0,914	744,0	119,9	0,642
70,0	955,2	1,82	0,901	744,4	120,6	0,639
80,0	967,0	1,84	0,889	745,0	121,4	0,636
90,0	978,6	1,86	0,878	745,7	122,1	0,633
100,0	990,1	1,88	0,866	746,5	122,9	0,630
120,0	1012,6	1,92	0,845	748,5	124,4	0,625
140,0	1034,8	1,96	0,825	751,0	126,0	0,620
160,0	1056,4	1,99	0,807	753,7	127,5	0,616
$T=1200\text{ K}$						
0,1	907,8	1,67	1,000	788,6	122,3	0,664
1,0	908,9	1,67	0,998	788,5	122,4	0,664
5,0	913,8	1,68	0,993	788,1	122,6	0,662
10,0	919,8	1,69	0,985	787,7	122,9	0,660
20,0	931,8	1,71	0,971	787,1	123,6	0,657
30,0	943,7	1,73	0,957	786,7	124,2	0,653
40,0	955,4	1,75	0,944	786,4	124,9	0,650
50,0	966,9	1,77	0,932	786,3	125,6	0,646
60,0	978,4	1,79	0,920	786,4	126,3	0,643
70,0	989,7	1,81	0,908	786,6	127,0	0,640
80,0	1000,9	1,83	0,897	787,0	127,7	0,637
90,0	1012,0	1,84	0,886	787,4	128,4	0,635
100,0	1023,0	1,86	0,875	788,0	129,1	0,632
120,0	1044,6	1,90	0,855	789,5	130,5	0,627
140,0	1065,8	1,93	0,836	791,4	131,9	0,622
160,0	1086,7	1,97	0,818	793,6	133,3	0,618
180,0	1107,1	2,00	0,802	796,1	134,8	0,614

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

 $T=1300\text{ K}$

0,1	944,9	1,67	1,000	830,7	128,8	0,664
1,0	945,9	1,67	0,999	830,7	128,9	0,664
5,0	950,6	1,68	0,993	830,3	129,1	0,662
10,0	956,3	1,69	0,986	829,8	129,4	0,661
20,0	967,7	1,70	0,973	829,1	130,0	0,657
30,0	979,1	1,72	0,960	828,6	130,6	0,654
40,0	990,2	1,74	0,948	828,2	131,3	0,651
50,0	1001,3	1,76	0,936	828,0	131,9	0,647
60,0	1012,3	1,78	0,925	827,9	132,5	0,645
70,0	1023,1	1,79	0,914	828,0	133,2	0,642
80,0	1033,9	1,81	0,903	828,1	133,8	0,639
90,0	1044,5	1,83	0,893	828,4	134,5	0,636
100,0	1055,0	1,85	0,883	828,8	135,1	0,634
120,0	1075,8	1,88	0,864	829,9	136,5	0,629
140,0	1096,2	1,91	0,846	831,3	137,8	0,624
160,0	1116,3	1,94	0,829	833,1	139,1	0,620
180,0	1136,0	1,97	0,813	835,1	140,5	0,616

 $T=1400\text{ K}$

0,1	980,5	1,67	1,000	871,9	135,2	0,664
1,0	981,5	1,67	0,999	871,8	135,3	0,664
5,0	986,0	1,68	0,994	871,4	135,5	0,662
10,0	991,5	1,68	0,987	870,9	135,8	0,661
20,0	1002,4	1,70	0,975	870,2	136,3	0,657
30,0	1013,3	1,72	0,963	869,5	136,9	0,654
40,0	1024,0	1,74	0,951	869,1	137,5	0,651
50,0	1034,6	1,75	0,940	868,7	138,1	0,648
60,0	1045,1	1,77	0,930	868,5	138,7	0,646
70,0	1055,5	1,78	0,919	868,4	139,3	0,643
80,0	1065,9	1,80	0,909	868,5	139,9	0,640
90,0	1076,1	1,82	0,899	868,6	140,5	0,638
100,0	1086,3	1,83	0,890	868,8	141,1	0,635
120,0	1106,3	1,86	0,872	869,6	142,4	0,630
140,0	1126,0	1,89	0,855	870,7	143,6	0,626
160,0	1145,3	1,92	0,838	872,0	144,9	0,622
180,0	1164,4	1,95	0,823	873,7	146,1	0,618
200,0	1183,1	1,98	0,809	875,6	147,4	0,614

 $T=1500\text{ K}$

0,1	1014,9	1,67	1,000	912,0	141,4	0,664
1,0	1015,9	1,67	0,999	911,9	141,5	0,664
5,0	1020,1	1,67	0,994	911,5	141,7	0,662
10,0	1025,4	1,68	0,988	911,1	142,0	0,661
20,0	1035,9	1,70	0,976	910,2	142,5	0,658
30,0	1046,3	1,71	0,965	909,6	143,0	0,655
40,0	1056,7	1,73	0,954	909,0	143,6	0,652
50,0	1066,9	1,75	0,944	908,6	144,2	0,649
60,0	1077,0	1,76	0,934	908,3	144,7	0,647
70,0	1087,1	1,78	0,924	908,1	145,3	0,644
80,0	1097,0	1,79	0,914	908,0	145,9	0,641
90,0	1106,9	1,81	0,905	908,0	146,4	0,639
100,0	1116,7	1,82	0,896	908,1	147,0	0,637

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
120,0	1136,0	1,85	0,879	908,6	148,2	0,632
140,0	1155,0	1,88	0,863	909,3	149,4	0,628
160,0	1173,8	1,90	0,847	910,4	150,6	0,624
180,0	1192,2	1,93	0,832	911,7	151,8	0,620
200,0	1210,4	1,96	0,818	913,2	152,9	0,616
220,0	1228,3	1,98	0,805	915,0	154,2	0,613

$T=1750$ K

0,1	1096,2	1,67	1,000	1008,5	156,4	0,664
1,0	1097,1	1,67	0,999	1008,4	156,5	0,664
5,0	1101,0	1,67	0,995	1008,0	156,6	0,663
10,0	1105,8	1,68	0,990	1007,5	156,9	0,661
20,0	1115,4	1,69	0,980	1006,6	157,3	0,659
30,0	1124,9	1,71	0,970	1005,9	157,8	0,656
40,0	1134,4	1,72	0,961	1005,2	158,3	0,654
50,0	1143,7	1,73	0,952	1004,6	158,8	0,651
60,0	1153,0	1,75	0,943	1004,1	159,3	0,649
70,0	1162,3	1,76	0,934	1003,7	159,8	0,646
80,0	1171,4	1,77	0,926	1003,4	160,3	0,644
90,0	1180,5	1,79	0,918	1003,2	160,8	0,642
100,0	1189,6	1,80	0,910	1003,1	161,3	0,640
120,0	1207,4	1,82	0,894	1003,0	162,3	0,636
140,0	1225,1	1,85	0,880	1003,2	163,4	0,632
160,0	1242,5	1,87	0,866	1003,6	164,4	0,628
180,0	1259,6	1,89	0,852	1004,3	165,5	0,624
200,0	1276,6	1,92	0,839	1005,2	166,5	0,621
220,0	1293,3	1,94	0,827	1006,3	167,6	0,618
240,0	1309,8	1,96	0,816	1007,5	168,7	0,615
260,0	1326,1	1,98	0,804	1008,9	169,7	0,612

$T=2000$ K

0,1	1171,9	1,67	1,000	1100,1	170,6	0,664
1,0	1172,7	1,67	0,999	1100,0	170,6	0,664
5,0	1176,3	1,67	0,996	1099,5	170,8	0,663
10,0	1180,7	1,68	0,991	1099,0	171,0	0,662
20,0	1189,6	1,69	0,982	1098,1	171,4	0,659
30,0	1198,4	1,70	0,974	1097,3	171,9	0,657
40,0	1207,2	1,71	0,966	1096,5	172,3	0,655
50,0	1215,9	1,72	0,958	1095,9	172,8	0,653
60,0	1224,5	1,74	0,950	1095,3	173,2	0,650
70,0	1233,1	1,75	0,942	1094,8	173,6	0,648
80,0	1241,6	1,76	0,935	1094,3	174,1	0,646
90,0	1250,1	1,77	0,927	1093,9	174,5	0,644
100,0	1258,5	1,78	0,920	1093,6	175,0	0,642
120,0	1275,2	1,80	0,906	1093,2	175,9	0,639
140,0	1291,7	1,82	0,893	1093,0	176,9	0,635
160,0	1308,0	1,84	0,880	1093,0	177,8	0,632
180,0	1324,1	1,87	0,868	1093,3	178,7	0,628
200,0	1340,0	1,89	0,857	1093,7	179,7	0,625
220,0	1355,7	1,91	0,845	1094,2	180,6	0,622
240,0	1371,3	1,93	0,835	1095,0	181,6	0,619
260,0	1386,7	1,94	0,824	1095,9	182,6	0,617
280,0	1401,9	1,96	0,814	1096,9	183,5	0,614
300,0	1417,0	1,98	0,805	1098,0	184,5	0,611

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=2250\text{ K}$						
0,1	1243,0	1,67	1,000	1187,1	184,1	0,664
1,0	1243,7	1,67	0,999	1187,1	184,1	0,664
5,0	1247,1	1,67	0,996	1186,6	184,3	0,663
10,0	1251,2	1,68	0,992	1186,1	184,5	0,662
20,0	1259,5	1,69	0,984	1185,2	184,9	0,660
30,0	1267,7	1,70	0,977	1184,3	185,3	0,658
40,0	1275,9	1,71	0,970	1183,5	185,7	0,656
50,0	1284,0	1,72	0,962	1182,8	186,1	0,654
60,0	1292,1	1,73	0,955	1182,2	186,5	0,652
70,0	1300,2	1,74	0,949	1181,6	186,9	0,650
80,0	1308,2	1,75	0,942	1181,0	187,3	0,648
90,0	1316,1	1,76	0,935	1180,5	187,7	0,646
100,0	1324,0	1,77	0,929	1180,1	188,1	0,645
120,0	1339,7	1,79	0,916	1179,5	189,0	0,641
140,0	1355,3	1,81	0,904	1179,0	189,8	0,638
160,0	1370,6	1,82	0,893	1178,7	190,6	0,635
180,0	1385,8	1,84	0,882	1178,6	191,5	0,632
200,0	1400,9	1,86	0,871	1178,7	192,4	0,629
220,0	1415,8	1,88	0,860	1178,9	193,2	0,626
240,0	1430,6	1,90	0,850	1179,3	194,1	0,623
260,0	1445,2	1,91	0,841	1179,8	195,0	0,621
280,0	1459,7	1,93	0,831	1180,4	195,9	0,618
300,0	1474,0	1,95	0,822	1181,1	196,7	0,616
$T=2500\text{ K}$						
0,1	1310,2	1,67	1,000	1270,3	197,0	0,664
1,0	1310,9	1,67	0,999	1270,2	197,0	0,664
5,0	1314,1	1,67	0,996	1269,8	197,2	0,663
10,0	1318,0	1,68	0,993	1269,3	197,4	0,662
20,0	1325,7	1,69	0,986	1268,3	197,7	0,660
30,0	1333,5	1,69	0,979	1267,4	198,1	0,658
40,0	1341,2	1,70	0,973	1266,6	198,4	0,657
50,0	1348,8	1,71	0,966	1265,9	198,8	0,655
60,0	1356,5	1,72	0,960	1265,2	199,2	0,653
70,0	1364,1	1,73	0,954	1264,5	199,6	0,651
80,0	1371,6	1,74	0,948	1263,9	199,9	0,650
90,0	1379,1	1,75	0,942	1263,4	200,3	0,648
100,0	1386,6	1,76	0,936	1262,9	200,7	0,646
120,0	1401,5	1,77	0,925	1262,0	201,5	0,643
140,0	1416,2	1,79	0,913	1261,4	202,2	0,640
160,0	1430,8	1,81	0,903	1260,9	203,0	0,637
180,0	1445,2	1,83	0,893	1260,5	203,8	0,634
200,0	1459,5	1,84	0,883	1260,3	204,6	0,632
220,0	1473,7	1,86	0,873	1260,3	205,4	0,629
240,0	1487,8	1,87	0,864	1260,4	206,2	0,627
260,0	1501,7	1,89	0,855	1260,6	207,0	0,624
280,0	1515,5	1,91	0,846	1260,9	207,8	0,622
300,0	1529,2	1,92	0,838	1261,3	208,6	0,620
350,0	1563,0	1,96	0,818	1262,9	210,7	0,614
$T=2750\text{ K}$						
0,1	1374,2	1,67	1,000	1349,8	209,3	0,664

Heon

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
1,0	1374,8	1,67	0,999	1349,7	209,4	0,664
5,0	1377,8	1,67	0,997	1349,3	209,5	0,663
10,0	1381,5	1,68	0,994	1348,8	209,7	0,662
20,0	1388,8	1,68	0,988	1347,9	210,0	0,661
30,0	1396,2	1,69	0,981	1347,0	210,3	0,659
40,0	1403,5	1,70	0,976	1346,2	210,7	0,657
50,0	1410,7	1,71	0,970	1345,4	211,0	0,656
60,0	1417,9	1,72	0,964	1344,7	211,4	0,654
70,0	1425,1	1,72	0,958	1344,0	211,7	0,653
80,0	1432,3	1,73	0,953	1343,4	212,1	0,651
90,0	1439,5	1,74	0,947	1342,8	212,4	0,649
100,0	1446,6	1,75	0,942	1342,2	212,8	0,648
120,0	1460,7	1,76	0,931	1341,2	213,5	0,645
140,0	1474,7	1,78	0,921	1340,4	214,2	0,642
160,0	1488,6	1,80	0,911	1339,8	214,9	0,640
180,0	1502,4	1,81	0,902	1339,2	215,7	0,637
200,0	1516,0	1,83	0,893	1338,9	216,4	0,634
220,0	1529,6	1,84	0,884	1338,6	217,1	0,632
240,0	1543,0	1,86	0,875	1338,5	217,9	0,630
260,0	1556,4	1,87	0,867	1338,4	218,6	0,627
280,0	1569,6	1,89	0,859	1338,5	219,4	0,625
300,0	1582,8	1,90	0,851	1338,7	220,1	0,623
350,0	1615,1	1,94	0,832	1339,6	222,0	0,618
400,0	1646,9	1,97	0,814	1341,0	224,0	0,613

$T=3000\text{ K}$

0,1	1435,3	1,67	1,000	1426,2	221,2	0,664
1,0	1435,9	1,67	0,999	1426,1	221,2	0,664
5,0	1438,7	1,67	0,997	1425,7	221,3	0,663
10,0	1442,2	1,67	0,994	1425,2	221,5	0,662
20,0	1449,2	1,68	0,989	1424,3	221,8	0,661
30,0	1456,2	1,69	0,983	1423,4	222,1	0,659
40,0	1463,1	1,70	0,978	1422,5	222,4	0,658
50,0	1470,0	1,70	0,972	1421,8	222,8	0,656
60,0	1476,9	1,71	0,967	1421,0	223,1	0,655
70,0	1483,8	1,72	0,962	1420,3	223,4	0,654
80,0	1490,6	1,73	0,957	1419,6	223,7	0,652
90,0	1497,4	1,73	0,952	1419,0	224,1	0,651
100,0	1504,2	1,74	0,947	1418,4	224,4	0,649
120,0	1517,7	1,76	0,937	1417,3	225,1	0,647
140,0	1531,1	1,77	0,928	1416,4	225,7	0,644
160,0	1544,4	1,79	0,919	1415,6	226,4	0,642
180,0	1557,6	1,80	0,910	1415,0	227,1	0,639
200,0	1570,7	1,81	0,901	1414,5	227,8	0,637
220,0	1583,7	1,83	0,893	1414,0	228,5	0,634
240,0	1596,6	1,84	0,885	1413,7	229,2	0,632
260,0	1609,4	1,85	0,877	1413,5	229,9	0,630
280,0	1622,1	1,87	0,869	1413,4	230,6	0,628
300,0	1634,7	1,88	0,862	1413,4	231,3	0,626
350,0	1665,9	1,91	0,844	1413,8	233,1	0,621
400,0	1696,6	1,95	0,827	1414,6	234,9	0,616

Раздел третий

Двухатомные газы

3.1. Азот

Уравнение состояния газообразного азота в виде вириального уравнения состояния с пятью вириальными коэффициентами (1.3) на базе потенциала Леннарда-Джонса (12-6) получено в результате обработки экспериментальных данных о сжимаемости, приведенных в табл. 3.1.

Для определения параметров потенциала ϵ/k и b_0 использовано 150 опытных точек, полученных в работах [73—77], в области температур $T=273,15 \div 1073,15$ К и плотности $\rho=0 \div 330$ кг/м³ и дополнительно еще 66 опытных точек из работы [78] при низких температурах — до $T=153$ К, но при более низкой плотности до 120 кг/м³. Погрешность всех этих экспериментальных данных находится в пределах 0,1%.

При составлении уравнения состояния использована аппроксимация табличных значений приведенных вириальных коэффициентов для потенциала Леннарда-Джонса (12-6) полиномами вида (2.6) — (2.9). При этом константы аппроксимации второго, четвертого и пятого приведенных вириальных коэффициентов приняты те, которые указаны в § 2.1.

В приведенный третий вириальный коэффициент введена поправка на неаддитивность, после чего произведена аппроксимация полиномом $C_n^* =$

$= \sum_{i=0} c_i T^{*-i}$. Константы аппроксимации имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1,54516620 \cdot 10^{-1} & c_5 &= 1,30316255 \cdot 10^2 \\ c_1 &= 2,12426094 \cdot 10^0 & c_6 &= -1,01524864 \cdot 10^2 \\ c_2 &= -1,33477890 \cdot 10^1 & c_7 &= 4,29313290 \cdot 10^1 \\ c_3 &= 4,91566996 \cdot 10^1 & c_8 &= -7,65037638 \cdot 10^0 \\ c_4 &= -1,01616493 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

Средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных полученным уравнением состояния $\delta_s=0,082\%$.

Значения констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $b_0=(2,2199 \pm \pm 0,0010) \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\epsilon/k=(96,186 \pm 0,048)$ К.

К настоящему времени получен обширный экспериментальный материал о вязкости разреженного азота. Критический анализ, выполненный в [59, 79, 80], показал, что данные, полученные до 1963 г. и базирующиеся на измерениях Траутца с соавторами, систематически занижены при высоких температурах

Таблица 3.1. Экспериментальные данные о сжимаемости азота в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Автор	Литературный источник
273—673	2—10	Хольборн, Отто (1924)	[73]
273—423	2—8	Михельс, Ваутерс, де Бур (1934)	[74]
273—423	4—40	Отто, Михельс, Ваутерс (1934)	[75]
273—423	20—300	Михельс, Ваутерс, де Бур (1936)	[76]
423—1073	5—100	Сорель (1958)	[77]
273	0,2—55	Канфилд, Леланд, Кабаяши (1965)	[78]

($T > 700$ K) по отношению к данным, полученным в последние годы. Работы [59, 80, 81] и многие другие позволили косвенным образом доказать ошибочность данных Траутца.

В результате в массив экспериментальных данных о вязкости разреженного азота включены 172 опытные точки ($T = 130 \div 2100$ K), полученные Кестином с сотрудниками [61, 82], Смитом с сотрудниками [62, 63, 83, 84], Гуеварой с сотрудниками [85] и Люстерником и Лавушечником [86]. Эти данные, полученные в различных лабораториях различными методами, имеют погрешность около 1% и согласуются между собой в пределах 2%.

Уравнение вязкости азота при пониженном давлении выбрано в виде уравнения Энскога (1.24). Для азота использованы константы аппроксимации комплекса $f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2.2)}$, приведенные в § 2.1. Относительная погрешность данных о вязкости принята равной 1%.

Для получения уравнения вязкости азота при повышенных давлениях к обработке приняты 217 опытных точек, приведенных в работах Голубева с сотрудниками [87, 88], Тимрота и Трактусевой [89], Кестина с соавторами [65, 90], Флина и Росса [66, 91], Као и Кобаяши [92], Михельса и Гибсона [93] в области температур $T = 148,15 \div 873$ K и в интервале плотностей $\rho = 0 \div 100$ кг/м³. Область наиболее достоверных данных ограничена температурным интервалом $T = 223 \div 523$ K; вне этого интервала измерения малочисленны и выполнены со значительно большей погрешностью. Относительная погрешность данных принята равной 1%.

Уравнение для вязкости азота при повышенных давлениях получено в виде вязкостного вириального уравнения (1.16). Второй и третий вязкостные вириальные коэффициенты аппроксимированы полиномами

$$B_{\eta}^* = \sum_{i=0}^8 k_i (1/T^*)^i \quad \text{и} \quad C_{\eta}^* = \sum_{i=0}^8 l_i (1/T^*)^i.$$

Константы аппроксимации имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} k_0 &= -1,12163980 \cdot 10^{-1} & l_0 &= 1,11630384 \cdot 10^{-1} \\ k_1 &= 2,41297777 \cdot 10^0 & l_1 &= 2,61744178 \cdot 10^0 \\ k_2 &= -6,42755520 \cdot 10^0 & l_2 &= -8,85542243 \cdot 10^0 \\ k_3 &= 1,27708960 \cdot 10^1 & l_3 &= 2,76504293 \cdot 10^1 \\ k_4 &= 5,15692179 \cdot 10^{-1} & l_4 &= -5,32729030 \cdot 10^1 \\ k_5 &= -4,27187176 \cdot 10^1 & l_5 &= 6,19913881 \cdot 10^1 \\ k_6 &= 5,89909004 \cdot 10^1 & l_6 &= -4,18509033 \cdot 10^1 \\ k_7 &= -3,27003963 \cdot 10^1 & l_7 &= 1,51006271 \cdot 10^1 \\ k_8 &= 6,72701056 \cdot 10^0 & l_8 &= -2,24999009 \cdot 10^0 \end{aligned}$$

В настоящее время не существует достаточно строгой теории, способной отобразить все тонкости переноса энергии многоатомными молекулами даже в разреженном газе, а имеющиеся теоретические модели позволяют получить только приближенные выражения. Поэтому наилучшая модель теплопроводности многоатомных газов должна выбираться не только с учетом уровня строгости заложенных в модель предпосылок, но даже в большей мере по результатам согласования теории с экспериментальными данными. Подробно этот вопрос рассмотрен в [22].

Известно большое число экспериментальных работ, посвященных изучению теплопроводности азота. К обработке приняты 97 опытных значений теплопроводности азота при атмосферном давлении в интервале температур $T = 153 \div 2500$ K, полученные Зибландом и Бартоном [94], Голубевым и Кальсиной [95], Варгафтиком и Зиминной [96], Мастоуским и Слепичкой [97], Фаубером и Спрингером [98] и Саксеной с соавторами [99, 100]. Для составления уравнения теплопроводности азота при повышенном давлении использовано 113 опытных точек Кейса [101], Джоанина [102], Голубева и

Кальсиной [95] и ле Нейндра [103] в области температур $T=153 \div 973$ К и в интервале плотностей $\rho=0 \div 100$ кг/м³. Критический анализ этих работ, выполненный в [80, 99], показал, что результаты почти всех авторов согласуются друг с другом: расхождения не превышают 4%.

Уравнение теплопроводности азота при пониженном давлении найдено в виде уравнения теплопроводности по теории Мейсона и Мончика (1.27). В азоте из-за асимметрии молекул наряду с энергией поступательного движения молекул значительная доля энергии переносится внутренними степенями свободы. В связи с этим в уравнении теплопроводности $\beta_0 \neq 1$. В [22] значения β_0 рассчитаны и аппроксимированы полиномом

$$\beta_0(T) = \sum_{i=0}^8 m_i (T/1000)^i. \quad (3.1)$$

Средняя квадратическая погрешность аппроксимации $\delta\beta_0=0,01\%$. Коэффициенты полинома имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} m_0 &= 1,24909410 \cdot 10^0 & m_5 &= 3,47590470 \cdot 10^0 \\ m_1 &= 5,13496312 \cdot 10^{-1} & m_6 &= -1,20434310 \cdot 10^0 \\ m_2 &= -2,11185242 \cdot 10^0 & m_7 &= 2,21206702 \cdot 10^{-1} \\ m_3 &= 4,9981757 \cdot 10^0 & m_8 &= -1,67762419 \cdot 10^{-2} \\ m_4 &= -5,64752504 \cdot 10^0 \end{aligned}$$

Уравнение теплопроводности азота при повышенном давлении получено в виде теплопроводностного вириального уравнения (1.17), ограниченного тремя членами ряда. Значения второго теплопроводностного вириального коэффициента для азота рассчитаны в [22] на основании предложенной там же модели; значения третьего теплопроводностного вириального коэффициента азота приняты по теории Кертисса [21].

Второй и третий теплопроводностные вириальные коэффициенты аппроксимированы полиномами по обратным степеням приведенных температур:

$$B_\lambda^* = \sum_{i=0}^8 p_i (1/T^*)^i; \quad C_\lambda^* = \sum_{i=0}^8 q_i (1/T^*)^i.$$

Константы аппроксимации имеют значения:

$$\begin{aligned} p_0 &= 7,50520845 \cdot 10^{-2} & q_0 &= 6,07925253 \cdot 10^{-2} \\ p_1 &= 9,17501428 \cdot 10^{-1} & q_1 &= 5,16638081 \cdot 10^0 \\ p_2 &= 1,70628207 \cdot 10^1 & q_2 &= -4,91980976 \cdot 10^1 \\ p_3 &= -1,36091864 \cdot 10^2 & q_3 &= 3,43574366 \cdot 10^2 \\ p_4 &= 4,81982928 \cdot 10^2 & q_4 &= -1,35325038 \cdot 10^3 \\ p_5 &= -9,16295128 \cdot 10^2 & q_5 &= 3,05208470 \cdot 10^3 \\ p_6 &= 9,67485344 \cdot 10^2 & q_6 &= -3,91534415 \cdot 10^3 \\ p_7 &= -5,37871223 \cdot 10^2 & q_7 &= 2,65602239 \cdot 10^3 \\ p_8 &= 1,23255525 \cdot 10^2 & q_8 &= -7,39460505 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

При наличии всех необходимых констант можно получить единые параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6) и составить согласованные уравнения сжимаемости, вязкости и теплопроводности азота низкой и умеренной плотности. Задача решена минимизацией функционала (1.18). Общее количество принятых к обработке точек

$$n = n_z + n_{n_0} + n_{\eta}^{z,n} + n_{\lambda_0} + n_{\chi}^{z,n} = 216 + 172 + 217 + 97 + 113 = 815.$$

При этом средние квадратические погрешности аппроксимации опытных данных об исследуемых свойствах азота составили: $\delta_z=0,092$; $\delta_{\eta}=1,074$; $\delta_{n_0}=1,175$; $\delta_{\eta}^{z,n}=0,993$; $\delta_{\lambda}=3,318$; $\delta_{\lambda_0}=4,410$; $\delta_{\chi}^{z,n}=1,995$.

Полученные единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) мало отличаются от констант уравнения состояния, полученного при обработке только данных о сжимаемости азота. Однако результаты совместной обработки показали возможность получения согласованных уравнений равновесных и неравновесных свойств: полученные уравнения сжимаемости, вязкости и теплопроводности отображают опытные данные с погрешностями экспериментов.

Указанные уравнения использованы для расчета таблиц теплофизических свойств азота. Таблицы рассчитаны в интервале температур от 300 до 2500 К. Температура 2500 К является температурой начала диссоциации для азота: при температуре ниже 300 К становится существенной анизотропная составляющая потенциала, и потенциал Леннарда-Джонса (12-6) не может отобразить здесь экспериментальные данные с высокой точностью. Область давлений при расчете таблиц определяется предельной плотностью, при которой использовались экспериментальные данные о сжимаемости, $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$.

Расчет таблиц по равновесным и неравновесным свойствам азота произведен по соотношениям, приведенным в первой главе. Для расчета идеально-газовых функций использованы данные [36, 42], причем за начало отсчета энтальпии азота принято состояние кристалла при 0 К. Табличные значения идеально-газовых функций аппроксимированы эмпирическими полиномами в интервале $T = 270 \div 3000 \text{ К}$:

$$\frac{h^0 - h_0^0 + \Delta h_0^0}{RT} = \sum_{j=0}^6 \alpha_j \tau^j; \quad \frac{c_p^0}{R} = \sum_{j=0}^6 \beta_j \tau^j; \quad \frac{s^0}{R} = \sum_{j=0}^7 \gamma_j \tau^j, \quad (3.2)$$

где $\tau = 1000/T$.

Численные значения коэффициентов в полиномах, описывающих идеально-газовые функции, следующие:

$$\begin{array}{lll} \alpha_0 = 4,58876328 \cdot 10^0 & \beta_0 = 4,57858103 \cdot 10^0 & \gamma_0 = 3,83353807 \cdot 10^1 \\ \alpha_1 = -1,21005191 \cdot 10^0 & \beta_1 = 5,92940454 \cdot 10^{-2} & \gamma_1 = -2,70093219 \cdot 10^1 \\ \alpha_2 = 1,63521313 \cdot 10^0 & \beta_2 = -1,75691358 \cdot 10^0 & \gamma_2 = 3,13222091 \cdot 10^1 \\ \alpha_3 = -7,07191187 \cdot 10^{-1} & \beta_3 = 1,53042758 \cdot 10^1 & \gamma_3 = -2,35792739 \cdot 10^1 \\ \alpha_4 = 1,72966886 \cdot 10^{-1} & \beta_4 = -5,74377936 \cdot 10^{-1} & \gamma_4 = 1,09623591 \cdot 10^1 \\ \alpha_5 = -2,25492587 \cdot 10^{-2} & \beta_5 = 1,03066672 \cdot 10^{-1} & \gamma_5 = -3,03316021 \cdot 10^0 \\ \alpha_6 = 1,21875763 \cdot 10^{-3} & \beta_6 = -7,24481276 \cdot 10^{-3} & \gamma_6 = 4,56295725 \cdot 10^{-1} \\ & & \gamma_7 = -2,86525149 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

При расчете таблиц теплофизических свойств азота исследованы следующие значения физических констант:

масса моля $\mu = 28,0134 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 296,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 247,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$;

единые параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = (95,9266466 \pm \pm 0,052) \text{ К}$; $b_0 = (2,21263142 \pm 0,0009) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Уравнение состояния азота в вириальной форме (1.3) имеет пять вириальных коэффициентов с аппроксимацией B^* , D^* и E^* , приведенной в § 2.1, и аппроксимацией C^* , приведенной в настоящем параграфе. Для вязкости и теплопроводности при повышенном давлении используются вириальные уравнения со вторым и третьим вириальными коэффициентами и аппроксимацией их, приведенной также в этом параграфе. Для расчета комплекса $f_n^{(3)}/\Omega^{(2,2)*}$, входящего в выражение для вязкости при пониженном давлении, используется аппроксимация, данная в § 2.1, а константы аппроксимации функции β_0 (3.1), необходимой для расчета теплопроводности, приведены в настоящем параграфе.

Результаты расчета теплофизических свойств азота приведены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2. Азот

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=500\text{ K}$						
0,1	0,67	1,0004	768,1	7,377	0,759	1,056
1,0	6,71	1,0040	767,7	6,692	0,760	1,061
2,0	13,37	1,0081	767,3	6,484	0,760	1,065
3,0	19,97	1,0122	766,9	6,362	0,761	1,070
4,0	26,52	1,0165	766,5	6,275	0,762	1,074
5,0	33,00	1,0209	766,2	6,206	0,762	1,079
6,0	39,43	1,0254	765,9	6,150	0,763	1,083
8,0	52,10	1,0347	765,3	6,061	0,764	1,091
10,0	64,53	1,0443	764,9	5,992	0,766	1,099
12,0	76,70	1,0543	764,5	5,934	0,767	1,107
16,0	100,27	1,0753	764,1	5,843	0,770	1,121
20,0	122,81	1,0974	764,1	5,771	0,772	1,133
25,0	149,54	1,1266	764,5	5,698	0,775	1,146
30,0	174,71	1,1571	765,3	5,638	0,778	1,157
35,0	198,39	1,1888	766,6	5,587	0,781	1,167
40,0	220,68	1,2214	768,2	5,542	0,784	1,175
45,0	241,66	1,2548	770,2	5,503	0,787	1,182
50,0	261,44	1,2887	772,5	5,468	0,789	1,188
60,0	297,78	1,3578	777,7	5,406	0,795	1,199
$T=600\text{ K}$						
0,1	0,56	1,0004	874,5	7,572	0,778	1,075
1,0	5,59	1,0042	874,5	6,887	0,778	1,078
2,0	11,14	1,0085	874,5	6,680	0,779	1,081
3,0	16,63	1,0129	874,5	6,558	0,779	1,084
4,0	22,08	1,0173	874,5	6,472	0,780	1,087
5,0	27,48	1,0217	874,5	6,404	0,781	1,090
6,0	32,83	1,0262	874,5	6,349	0,781	1,093
8,0	43,39	1,0354	874,7	6,261	0,782	1,098
10,0	53,75	1,0447	874,9	6,193	0,783	1,104
12,0	63,92	1,0543	875,2	6,136	0,784	1,109
20,0	102,65	1,0941	876,9	5,977	0,788	1,127
25,0	125,34	1,1201	878,4	5,906	0,791	1,137
30,0	146,89	1,1468	880,2	5,848	0,793	1,145
35,0	167,38	1,1742	882,3	5,798	0,796	1,152
40,0	186,85	1,2021	884,7	5,755	0,798	1,159
45,0	205,37	1,2304	887,3	5,717	0,801	1,165
50,0	222,99	1,2591	890,2	5,683	0,803	1,170
60,0	255,79	1,3172	896,3	5,623	0,807	1,179
70,0	285,69	1,3759	903,0	5,573	0,812	1,186
$T=700\text{ K}$						
0,1	0,48	1,0004	983,2	7,741	0,801	1,098
1,0	4,79	1,0042	983,4	7,057	0,802	1,100
2,0	9,55	1,0083	983,6	6,851	0,802	1,102
3,0	14,26	1,0126	983,9	6,729	0,802	1,105
4,0	18,93	1,0168	984,1	6,643	0,803	1,107
5,0	23,57	1,0211	984,4	6,576	0,803	1,109
6,0	28,16	1,0254	984,7	6,521	0,804	1,111
8,0	37,24	1,0341	985,3	6,434	0,805	1,115
10,0	46,15	1,0429	986,0	6,366	0,806	1,119
12,0	54,91	1,0518	986,7	6,311	0,807	1,122
16,0	71,98	1,0699	988,2	6,222	0,808	1,129

Азот

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
20,0	88,45	1,0883	989,9	6,153	0,810	1,136
25,0	108,24	1,1118	992,3	6,084	0,812	1,143
30,0	127,15	1,1356	994,8	6,027	0,814	1,149
35,0	145,25	1,1598	997,6	5,978	0,816	1,155
40,0	162,56	1,1843	1000,6	5,936	0,818	1,161
45,0	179,14	1,2091	1003,7	5,899	0,820	1,165
50,0	195,02	1,2340	1007,0	5,865	0,822	1,170
60,0	224,85	1,2844	1014,0	5,807	0,826	1,177
70,0	252,37	1,3351	1021,4	5,758	0,830	1,183
80,0	277,83	1,3859	1029,1	5,715	0,834	1,189
<i>T</i> =800 K						
0,1	0,42	1,0004	1094,2	7,891	0,826	1,122
1,0	4,19	1,0040	1094,6	7,207	0,826	1,124
2,0	8,36	1,0079	1095,0	7,000	0,826	1,126
3,0	12,49	1,0119	1095,4	6,879	0,827	1,127
4,0	16,58	1,0159	1095,9	6,793	0,827	1,129
5,0	20,65	1,0200	1096,3	6,726	0,827	1,130
6,0	24,68	1,0240	1096,8	6,672	0,828	1,132
8,0	32,64	1,0321	1097,8	6,585	0,829	1,135
10,0	40,48	1,0403	1098,8	6,518	0,829	1,138
12,0	48,20	1,0486	1099,8	6,463	0,830	1,141
16,0	63,26	1,0653	1101,9	6,375	0,832	1,146
20,0	77,84	1,0821	1104,2	6,307	0,833	1,151
25,0	95,42	1,1034	1107,2	6,238	0,835	1,156
30,0	112,31	1,1249	1110,4	6,182	0,837	1,161
35,0	128,55	1,1467	1113,7	6,134	0,839	1,166
40,0	144,16	1,1686	1117,1	6,092	0,840	1,170
45,0	159,18	1,1906	1120,7	6,056	0,842	1,174
50,0	173,64	1,2128	1124,3	6,023	0,844	1,178
60,0	200,99	1,2573	1132,0	5,965	0,847	1,184
70,0	226,43	1,3020	1140,0	5,917	0,850	1,189
80,0	250,17	1,3468	1148,2	5,875	0,854	1,194
90,0	272,39	1,3916	1156,7	5,837	0,857	1,198
100,0	293,24	1,4362	1165,3	5,804	0,860	1,202
<i>T</i> =900 K						
0,1	0,37	1,0004	1207,6	8,023	0,849	1,146
1,0	3,73	1,0037	1208,1	7,340	0,849	1,147
2,0	7,43	1,0075	1208,7	7,133	0,850	1,148
3,0	11,11	1,0112	1209,3	7,013	0,850	1,150
4,0	14,75	1,0150	1209,9	6,927	0,850	1,151
5,0	18,37	1,0187	1210,5	6,860	0,851	1,152
6,0	21,97	1,0225	1211,1	6,806	0,851	1,153
8,0	29,07	1,0301	1212,3	6,719	0,852	1,155
10,0	36,08	1,0377	1213,5	6,652	0,852	1,158
12,0	42,98	1,0453	1214,8	6,597	0,853	1,160
16,0	56,47	1,0607	1217,4	6,510	0,854	1,164
20,0	69,57	1,0762	1220,1	6,443	0,855	1,168
25,0	85,42	1,0957	1223,6	6,375	0,857	1,172
30,0	100,70	1,1153	1227,2	6,319	0,859	1,176
35,0	115,44	1,1350	1230,9	6,271	0,860	1,180
40,0	129,67	1,1548	1234,8	6,230	0,862	1,183
45,0	143,41	1,1747	1238,7	6,194	0,863	1,187

Azom

p	ρ	z	h	s	c_c	c_p
50,0	156,69	1,1946	1242,7	6,161	0,865	1,189
60,0	181,94	1,2346	1250,9	6,105	0,868	1,195
70,0	205,59	1,2746	1259,4	6,057	0,870	1,199
80,0	227,80	1,3147	1268,1	6,015	0,873	1,203
90,0	248,71	1,3547	1276,9	5,973	0,876	1,207
100,0	268,44	1,3946	1285,9	5,945	0,879	1,210

$T=1000\text{ K}$

0,1	0,34	1,0003	1323,3	8,144	0,870	1,167
1,0	3,36	1,0035	1323,9	7,460	0,871	1,168
5,0	16,56	1,0175	1326,7	6,981	0,872	1,172
10,0	32,55	1,0351	1330,3	6,774	0,873	1,177
20,0	62,93	1,0707	1337,8	6,565	0,876	1,185
30,0	91,34	1,1066	1345,6	6,442	0,879	1,191
40,0	117,93	1,1428	1353,8	6,354	0,881	1,197
50,0	142,89	1,1790	1362,3	6,286	0,884	1,202
60,0	166,34	1,2153	1371,0	6,230	0,887	1,207
70,0	188,44	1,2516	1379,9	6,182	0,889	1,211
80,0	209,29	1,2879	1388,9	6,141	0,891	1,214
90,0	229,02	1,3240	1398,1	6,105	0,894	1,217
100,0	247,73	1,3601	1407,4	6,072	0,896	1,220
120,0	282,39	1,4317	1426,3	6,015	0,900	1,225

$T=1100\text{ K}$

0,1	0,31	1,0003	1441,0	8,255	0,890	1,187
1,0	3,05	1,0033	1441,7	7,571	0,890	1,187
5,0	15,07	1,0164	1444,8	7,092	0,891	1,190
10,0	29,66	1,0328	1448,8	6,885	0,892	1,194
20,0	57,48	1,0658	1457,0	6,677	0,895	1,200
30,0	83,61	1,0990	1465,5	6,555	0,897	1,206
40,0	108,21	1,1322	1474,2	6,468	0,899	1,211
50,0	131,40	1,1655	1483,1	6,400	0,901	1,215
60,0	153,30	1,1988	1492,3	6,344	0,904	1,219
70,0	174,03	1,2320	1501,5	6,297	0,906	1,222
80,0	193,69	1,2651	1510,9	6,256	0,908	1,225
90,0	212,36	1,2981	1520,4	6,220	0,910	1,228
100,0	230,12	1,3310	1529,9	6,187	0,912	1,230
120,0	263,22	1,3964	1549,3	6,131	0,916	1,234
140,0	293,49	1,4611	1568,8	6,084	0,920	1,238

$T=1200\text{ K}$

0,1	0,28	1,0003	1560,6	8,358	0,907	1,204
1,0	2,80	1,0031	1561,3	7,674	0,907	1,204
5,0	13,83	1,0153	1564,7	7,196	0,908	1,207
10,0	27,24	1,0307	1569,0	6,989	0,909	1,210
20,0	52,90	1,0614	1577,8	6,781	0,911	1,215
30,0	77,12	1,0922	1586,8	6,659	0,913	1,219
40,0	100,01	1,1230	1595,9	6,573	0,915	1,223
50,0	121,68	1,1538	1605,3	6,505	0,917	1,227
60,0	142,23	1,1845	1614,7	6,450	0,919	1,230
70,0	161,75	1,2151	1624,3	6,403	0,921	1,233
80,0	180,33	1,2456	1633,9	6,362	0,923	1,235
90,0	198,04	1,2760	1643,6	6,326	0,924	1,238
100,0	214,95	1,3062	1653,4	6,294	0,926	1,240

A30m

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	c_v	c_p
120,0	246,59	1,3663	1673,2	6,238	0,929	1,244
140,0	275,68	1,4258	1693,0	6,191	0,933	1,247
<i>T</i> =1300 K						
0,1	0,26	1,0003	1681,7	8,454	0,922	1,219
1,0	2,58	1,0029	1682,5	7,771	0,922	1,219
5,0	12,78	1,0144	1686,1	7,292	0,923	1,221
10,0	25,19	1,0288	1690,7	7,086	0,924	1,224
20,0	49,02	1,0575	1699,9	6,879	0,926	1,228
30,0	71,58	1,0862	1709,3	6,757	0,927	1,232
40,0	92,99	1,1149	1718,9	6,671	0,929	1,235
50,0	113,33	1,1435	1728,5	6,603	0,931	1,238
60,0	132,69	1,1720	1738,2	6,548	0,932	1,241
70,0	151,14	1,2004	1748,1	6,501	0,934	1,243
80,0	168,76	1,2286	1758,0	6,461	0,936	1,245
90,0	185,60	1,2568	1767,9	6,425	0,937	1,247
100,0	201,72	1,2848	1777,9	6,393	0,939	1,249
120,0	232,02	1,3405	1798,0	6,337	0,942	1,252
140,0	260,00	1,3955	1818,1	6,290	0,944	1,255
160,0	285,98	1,4500	1838,3	6,250	0,947	1,258
<i>T</i> =1400 K						
0,1	0,24	1,0003	1804,3	8,545	0,935	1,232
1,0	2,40	1,0027	1805,1	7,862	0,935	1,232
5,0	11,87	1,0135	1808,9	7,384	0,936	1,234
10,0	23,43	1,0270	1813,7	7,177	0,937	1,236
20,0	45,67	1,0540	1823,3	6,970	0,938	1,240
30,0	66,80	1,0809	1833,1	6,849	0,940	1,243
40,0	86,91	1,1077	1842,9	6,763	0,941	1,245
50,0	106,08	1,1344	1852,8	6,695	0,943	1,248
60,0	124,38	1,1610	1862,8	6,641	0,944	1,250
70,0	141,87	1,1874	1872,8	6,594	0,946	1,252
80,0	158,62	1,2138	1882,9	6,554	0,947	1,254
90,0	174,67	1,2400	1893,1	6,518	0,948	1,256
100,0	190,07	1,2661	1903,2	6,486	0,950	1,258
120,0	219,12	1,3180	1923,6	6,431	0,952	1,260
140,0	246,07	1,3692	1944,0	6,384	0,955	1,263
160,0	271,18	1,4199	1964,5	6,343	0,957	1,265
180,0	294,67	1,4701	1984,9	6,307	0,960	1,267
<i>T</i> =1500 K						
0,1	0,22	1,0003	1928,1	8,631	0,947	1,244
1,0	2,24	1,0025	1929,0	7,948	0,947	1,244
5,0	11,09	1,0127	1932,9	7,470	0,948	1,245
10,0	21,90	1,0255	1937,8	7,264	0,948	1,247
20,0	42,75	1,0508	1947,8	7,057	0,950	1,250
30,0	62,62	1,0761	1957,8	6,936	0,951	1,253
40,0	81,59	1,1012	1967,9	6,849	0,952	1,255
50,0	99,72	1,1263	1978,1	6,783	0,954	1,257
60,0	117,07	1,1512	1988,3	6,728	0,955	1,259
70,0	133,70	1,1760	1998,5	6,681	0,956	1,261
80,0	149,66	1,2007	2008,8	6,641	0,957	1,262
90,0	164,99	1,2253	2019,1	6,606	0,958	1,264
100,0	179,74	1,2497	2029,4	6,574	0,960	1,265

Aзот

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
120,0	207,63	1,2982	2050,0	6,519	0,962	1,268
140,0	233,61	1,3461	2070,7	6,472	0,964	1,270
160,0	267,89	1,3936	2091,3	6,431	0,966	1,272
180,0	280,68	1,4405	2111,9	6,396	0,968	1,274

T = 1750 K

0,1	0,19	1,0002	2242,0	8,827	0,970	1,267
1,0	1,92	1,0022	2243,0	8,144	0,970	1,267
5,0	9,52	1,0111	2247,2	7,666	0,971	1,268
10,0	18,84	1,0222	2252,5	7,460	0,971	1,269
20,0	36,88	1,0442	2263,0	7,254	0,972	1,271
30,0	54,18	1,0661	2273,6	7,133	0,973	1,273
40,0	70,79	1,0879	2284,2	7,047	0,974	1,274
50,0	86,75	1,1096	2294,8	6,980	0,975	1,276
60,0	102,12	1,1312	2305,4	6,926	0,976	1,277
70,0	116,93	1,1526	2316,0	6,880	0,977	1,279
80,0	131,21	1,1739	2326,6	6,840	0,978	1,280
90,0	144,99	1,1951	2337,2	6,804	0,979	1,281
100,0	158,31	1,2162	2347,8	6,773	0,980	1,282
120,0	188,66	1,2579	2369,0	6,718	0,981	1,284
140,0	207,46	1,2993	2390,1	6,671	0,983	1,285
160,0	229,87	1,3401	2411,2	6,631	0,985	1,287
180,0	251,03	1,3805	2432,2	6,596	0,986	1,288
200,0	271,06	1,4206	2453,1	6,564	0,988	1,289
220,0	290,08	1,4601	2473,9	6,535	0,989	1,290

T = 2000 K

0,1	0,17	1,0002	2561,1	9,000	0,988	1,284
1,0	1,68	1,0020	2562,0	8,317	0,988	1,285
5,0	8,34	1,0098	2566,4	7,839	0,988	1,285
10,0	16,52	1,0196	2571,9	7,633	0,988	1,286
20,0	32,43	1,0390	2582,9	7,427	0,989	1,287
30,0	47,75	1,0584	2593,8	7,306	0,990	1,288
40,0	62,53	1,0776	2604,7	7,221	0,991	1,289
50,0	76,81	1,0967	2615,6	7,154	0,991	1,290
60,0	90,60	1,1156	2626,5	7,100	0,992	1,291
70,0	103,94	1,1345	2637,4	7,054	0,993	1,292
80,0	116,86	1,1532	2648,3	7,014	0,993	1,293
90,0	129,38	1,1719	2659,1	6,979	0,994	1,294
100,0	141,52	1,1904	2669,9	6,947	0,995	1,295
120,0	164,74	1,2271	2691,5	6,893	0,996	1,296
140,0	186,67	1,2634	2713,0	6,846	0,997	1,297
160,0	207,44	1,2994	2734,3	6,806	0,998	1,298
180,0	227,16	1,3349	2755,6	6,771	1,000	1,299
200,0	245,92	1,3701	2776,8	6,739	1,001	1,300
220,0	263,81	1,4049	2797,8	6,710	1,002	1,301
240,0	280,90	1,4394	2818,7	6,684	1,003	1,302
260,0	297,26	1,4735	2839,6	6,660	1,004	1,303

T = 2250 K

0,1	0,15	1,0002	2883,8	9,153	1,001	1,297
1,0	1,49	1,0018	2884,9	8,470	1,001	1,298
5,0	7,42	1,0088	2889,4	7,992	1,001	1,298
10,0	14,72	1,0175	2895,0	7,786	1,001	1,298
20,0	28,94	1,0349	2906,2	7,580	1,002	1,299
30,0	42,70	1,0522	2917,4	7,460	1,002	1,300

Азот

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
40,0	56,01	1,0693	2928,5	7,374	1,003	1,301
50,0	68,92	1,0864	2939,7	7,308	1,003	1,302
60,0	81,43	1,1033	2950,8	7,254	1,004	1,302
70,0	93,58	1,1201	2961,8	7,208	1,005	1,303
80,0	105,37	1,1369	2972,9	7,168	1,005	1,304
90,0	116,84	1,1535	2983,9	7,133	1,006	1,304
100,0	127,98	1,1700	2994,9	7,101	1,006	1,305
120,0	149,40	1,2028	3016,7	7,047	1,007	1,306
140,0	169,72	1,2352	3038,5	7,001	1,008	1,307
160,0	189,06	1,2673	3060,1	6,961	1,009	1,308
180,0	207,50	1,2990	3081,6	6,925	1,010	1,308
200,0	225,12	1,3304	3102,9	6,894	1,011	1,309
220,0	241,97	1,3615	3124,2	6,865	1,012	1,310
240,0	258,13	1,3923	3145,3	6,839	1,013	1,310
260,0	273,65	1,4228	3166,3	6,815	1,013	1,311
280,0	288,57	1,4530	3187,2	6,793	1,014	1,312

T = 2500 К

0,1	0,13	1,0002	3209,5	9,289	1,011	1,308
1,0	1,35	1,0016	3210,5	8,606	1,011	1,308
5,0	6,69	1,0079	3215,1	8,128	1,011	1,308
10,0	13,27	1,0158	3220,8	7,923	1,011	1,308
20,0	26,13	1,0315	3232,2	7,717	1,012	1,309
30,0	38,61	1,0471	3243,6	7,596	1,012	1,309
40,0	50,73	1,0626	3254,9	7,511	1,013	1,310
50,0	62,51	1,0780	3266,2	7,444	1,013	1,311
60,0	73,96	1,0933	3277,5	7,390	1,013	1,311
70,0	85,11	1,1085	3288,7	7,344	1,014	1,312
80,0	95,96	1,1236	3299,9	7,304	1,014	1,312
90,0	106,53	1,1386	3311,0	7,269	1,015	1,312
100,0	116,83	1,1535	3322,1	7,238	1,015	1,313
120,0	136,69	1,1831	3344,2	7,184	1,016	1,314
140,0	155,63	1,2124	3366,1	7,138	1,017	1,314
160,0	173,71	1,2413	3387,9	7,098	1,017	1,315
180,0	191,01	1,2700	3409,6	7,063	1,018	1,316
200,0	207,60	1,2984	3431,1	7,031	1,019	1,316
220,0	223,52	1,3265	3452,5	7,002	1,019	1,317
240,0	238,83	1,3543	3473,8	6,976	1,020	1,317
260,0	253,57	1,3819	3494,9	6,952	1,021	1,318
280,0	267,78	1,4092	3515,9	6,930	1,022	1,318
300,0	281,50	1,4363	3536,8	6,909	1,022	1,319

Таблица 3.3. Азот

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
<i>T</i> = 500 К						
0,1	454,6	1,39	1,000	257,6	38,5	0,707
1,0	457,0	1,40	1,003	258,3	38,7	0,709
2,0	459,7	1,41	1,005	259,2	38,9	0,710
3,0	462,4	1,42	1,007	260,0	39,1	0,711
4,0	465,3	1,43	1,009	260,9	39,4	0,712
5,0	468,1	1,45	1,011	261,8	39,6	0,713

Aзот

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
6,0	471,0	1,46	1,012	262,8	39,8	0,714
8,0	477,0	1,48	1,013	264,9	40,3	0,716
10,0	483,2	1,51	1,013	267,0	40,9	0,718
12,0	489,5	1,53	1,011	269,3	41,4	0,720
16,0	502,6	1,58	1,006	274,2	42,5	0,723
20,0	516,3	1,64	0,996	279,4	43,7	0,725
25,0	533,9	1,70	0,981	286,3	45,2	0,727
30,0	551,9	1,77	0,962	293,5	46,7	0,728
35,0	570,3	1,84	0,942	300,9	48,2	0,729
40,0	588,8	1,91	0,920	308,4	49,7	0,729
45,0	607,4	1,98	0,898	315,9	51,2	0,730
50,0	625,9	2,05	0,876	323,5	52,7	0,730
60,0	662,5	2,18	0,833	338,5	55,6	0,730

T=600 K

0,1	496,3	1,38	1,000	291,9	44,3	0,708
1,0	498,7	1,39	1,000	292,4	44,5	0,708
2,0	501,4	1,40	1,000	293,1	44,7	0,709
3,0	504,1	1,41	1,000	293,7	44,9	0,709
4,0	506,9	1,42	1,000	294,4	45,1	0,710
5,0	509,7	1,43	0,999	295,1	45,3	0,710
6,0	512,5	1,44	0,998	295,8	45,5	0,710
8,0	518,2	1,46	0,996	297,3	45,9	0,711
10,0	524,0	1,48	0,994	298,9	46,4	0,712
12,0	529,9	1,50	0,990	300,6	46,8	0,712
16,0	542,0	1,54	0,982	304,3	47,7	0,713
20,0	554,3	1,58	0,972	308,2	48,6	0,714
25,0	570,1	1,63	0,958	313,4	49,8	0,715
30,0	586,0	1,68	0,942	318,8	51,1	0,715
35,0	602,2	1,73	0,924	324,5	52,3	0,715
40,0	618,4	1,79	0,907	330,3	53,6	0,714
45,0	634,6	1,84	0,888	336,2	54,8	0,714
50,0	650,9	1,89	0,870	342,2	56,1	0,714
60,0	683,1	1,99	0,835	354,2	58,6	0,713
70,0	714,9	2,09	0,801	366,3	61,0	0,712

T=700 K

0,1	533,9	1,37	1,000	323,8	50,2	0,709
1,0	536,2	1,38	0,999	324,3	50,3	0,709
2,0	538,9	1,39	0,998	324,7	50,5	0,709
3,0	541,5	1,39	0,996	325,2	50,7	0,709
4,0	544,2	1,40	0,995	325,7	50,8	0,709
5,0	546,9	1,41	0,993	326,3	51,0	0,709
6,0	549,6	1,42	0,992	326,9	51,2	0,709
8,0	555,0	1,43	0,988	328,0	51,5	0,710
10,0	560,6	1,45	0,984	329,3	51,9	0,710
12,0	566,1	1,47	0,980	330,6	52,3	0,710
16,0	577,4	1,50	0,971	333,4	53,1	0,710
20,0	588,7	1,53	0,960	336,4	53,9	0,710
25,0	603,2	1,58	0,947	340,5	54,9	0,709
30,0	617,7	1,62	0,932	344,8	55,9	0,709
35,0	632,3	1,66	0,916	349,2	57,0	0,708
40,0	647,0	1,70	0,901	353,9	58,1	0,707
45,0	661,6	1,74	0,885	358,6	59,1	0,707
50,0	676,3	1,78	0,869	363,5	60,2	0,706
60,0	705,4	1,86	0,838	373,4	62,4	0,705

Azom

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
70,0	734,1	1,94	0,808	383,4	64,5	0,703
80,0	762,4	2,02	0,780	393,4	66,6	0,702

$T=800$ K

0,1	568,4	1,36	1,000	354,0	56,0	0,710
1,0	570,7	1,37	0,998	354,3	56,1	0,710
2,0	573,3	1,37	0,996	354,7	56,3	0,709
3,0	575,8	1,38	0,994	355,0	56,4	0,709
4,0	578,4	1,39	0,992	355,5	56,6	0,709
5,0	581,0	1,39	0,990	355,9	56,7	0,709
6,0	583,6	1,40	0,988	356,3	56,9	0,709
8,0	588,8	1,41	0,984	357,2	57,2	0,709
10,0	594,0	1,43	0,980	358,2	57,5	0,709
12,0	599,3	1,44	0,975	359,3	57,8	0,708
16,0	609,8	1,47	0,965	361,5	58,5	0,708
20,0	620,5	1,50	0,955	363,9	59,2	0,707
25,0	633,9	1,53	0,941	367,1	60,1	0,706
30,0	647,4	1,57	0,927	370,6	61,0	0,705
35,0	660,9	1,60	0,913	374,2	61,9	0,704
40,0	674,4	1,64	0,899	378,0	62,9	0,703
45,0	687,9	1,67	0,885	381,9	63,8	0,702
50,0	701,4	1,71	0,871	385,9	64,8	0,701
60,0	728,1	1,78	0,843	394,1	66,7	0,700
70,0	754,6	1,84	0,816	402,6	68,6	0,698
80,0	780,7	1,91	0,791	411,1	70,5	0,696
90,0	806,3	1,97	0,766	419,8	72,4	0,695
100,0	831,5	2,03	0,744	428,4	74,2	0,694

$T=900$ K

0,1	600,7	1,35	1,000	382,6	61,8	0,710
1,0	602,9	1,36	0,998	382,9	61,9	0,710
2,0	605,3	1,36	0,996	383,2	62,0	0,710
3,0	607,8	1,37	0,994	383,5	62,1	0,709
4,0	610,3	1,37	0,991	383,8	62,3	0,709
5,0	612,8	1,38	0,989	384,1	62,4	0,709
6,0	615,2	1,39	0,987	384,5	62,5	0,709
8,0	620,2	1,40	0,982	385,2	62,8	0,708
10,0	625,2	1,41	0,977	386,0	63,1	0,708
12,0	630,2	1,42	0,972	386,8	63,4	0,708
16,0	640,2	1,45	0,962	388,6	64,0	0,707
20,0	650,3	1,47	0,952	390,6	64,6	0,706
25,0	662,9	1,50	0,939	393,2	65,4	0,704
30,0	675,5	1,53	0,926	396,0	66,2	0,703
35,0	688,2	1,56	0,913	399,0	67,1	0,702
40,0	700,8	1,59	0,900	402,1	67,9	0,701
45,0	713,4	1,62	0,887	405,4	68,8	0,700
50,0	725,9	1,65	0,874	408,7	69,6	0,698
60,0	750,9	1,71	0,848	415,7	71,3	0,696
70,0	775,5	1,77	0,823	422,8	73,1	0,694
80,0	799,9	1,82	0,800	430,2	74,8	0,692
90,0	823,9	1,88	0,778	437,7	76,5	0,690
100,0	847,4	1,93	0,757	445,2	78,2	0,689

$T=1000$ K

0,1	631,1	1,34	1,000	410,0	67,4	0,710
-----	-------	------	-------	-------	------	-------

Aзот

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
1,0	633,2	1,35	0,998	410,2	67,5	0,710
5,0	642,7	1,37	0,988	411,2	68,0	0,709
10,0	654,6	1,39	0,976	412,7	68,7	0,707
20,0	678,5	1,45	0,952	416,5	70,0	0,704
30,0	702,5	1,50	0,927	420,9	71,5	0,702
40,0	726,3	1,56	0,902	426,0	73,0	0,699
50,0	750,0	1,61	0,877	431,6	74,5	0,696
60,0	773,5	1,66	0,854	437,5	76,1	0,694
70,0	796,7	1,71	0,831	443,7	77,7	0,691
80,0	819,6	1,76	0,809	450,0	79,3	0,689
90,0	842,2	1,80	0,788	456,5	80,9	0,687
100,0	864,5	1,85	0,768	463,1	82,4	0,685
120,0	908,0	1,94	0,732	476,5	85,5	0,682

$T=1100\text{ K}$

0,1	660,1	1,33	1,000	436,4	73,0	0,710
1,0	662,1	1,34	0,998	436,6	73,1	0,709
5,0	671,3	1,36	0,988	437,4	73,5	0,708
10,0	682,7	1,38	0,976	438,6	74,1	0,707
20,0	705,6	1,43	0,952	441,6	75,3	0,704
30,0	728,3	1,48	0,928	445,3	76,7	0,701
40,0	751,0	1,53	0,904	449,6	78,0	0,698
50,0	773,5	1,57	0,881	454,3	79,4	0,695
60,0	795,7	1,62	0,859	459,4	80,9	0,692
70,0	817,7	1,66	0,838	464,7	82,3	0,690
80,0	839,5	1,71	0,817	470,3	83,8	0,687
90,0	860,9	1,75	0,798	476,0	85,3	0,685
100,0	882,1	1,79	0,779	481,8	86,8	0,683
120,0	923,5	1,87	0,744	493,7	89,7	0,680
140,0	963,7	1,95	0,713	505,7	92,5	0,677

$T=1200\text{ K}$

0,1	687,8	1,33	1,000	461,9	78,3	0,710
1,0	689,8	1,33	0,998	462,0	78,4	0,709
5,0	698,6	1,35	0,988	462,6	78,8	0,708
10,0	709,6	1,37	0,976	463,6	79,4	0,706
20,0	731,5	1,42	0,953	466,1	80,5	0,703
30,0	753,3	1,46	0,930	469,2	81,7	0,700
40,0	775,0	1,50	0,908	472,8	83,0	0,697
50,0	796,4	1,54	0,886	476,8	84,3	0,694
60,0	817,7	1,58	0,865	481,2	85,6	0,691
70,0	838,7	1,63	0,845	485,8	87,0	0,689
80,0	859,4	1,66	0,825	490,7	88,3	0,686
90,0	879,9	1,70	0,807	495,7	89,7	0,684
100,0	900,1	1,74	0,789	500,9	91,1	0,682
120,0	939,7	1,81	0,756	511,5	93,8	0,678
140,0	978,2	1,88	0,726	522,3	96,5	0,675

$T=1300\text{ K}$

0,1	714,4	1,32	1,000	486,6	83,5	0,710
1,0	716,3	1,33	0,998	486,7	83,6	0,710
5,0	724,8	1,34	0,988	487,2	84,0	0,708
10,0	735,4	1,36	0,977	487,9	84,5	0,706
20,0	756,6	1,40	0,954	490,0	85,6	0,703
30,0	777,5	1,44	0,932	492,6	86,7	0,700

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
40,0	798,3	1,48	0,911	495,6	87,8	0,697
50,0	818,9	1,52	0,890	499,1	89,0	0,694
60,0	839,2	1,56	0,870	502,9	90,3	0,691
70,0	859,3	1,59	0,851	506,9	91,5	0,688
80,0	879,2	1,63	0,833	511,1	92,8	0,686
90,0	898,9	1,67	0,815	515,6	94,1	0,683
100,0	918,3	1,70	0,798	520,2	95,4	0,681
120,0	956,3	1,77	0,766	529,7	98,0	0,677
140,0	993,3	1,83	0,738	539,5	100,5	0,674
160,0	1029,3	1,89	0,711	549,5	103,1	0,671

$T=1400\text{ K}$

0,1	740,1	1,32	1,000	510,6	88,6	0,710
1,0	741,9	1,32	0,998	510,6	88,7	0,710
5,0	750,2	1,34	0,989	511,0	89,0	0,708
10,0	760,4	1,35	0,978	511,6	89,5	0,707
20,0	780,8	1,39	0,956	513,3	90,4	0,703
30,0	801,0	1,43	0,935	515,5	91,5	0,700
40,0	821,0	1,46	0,914	518,1	92,6	0,697
50,0	840,8	1,50	0,894	521,0	93,7	0,694
60,0	860,4	1,53	0,875	524,3	94,8	0,691
70,0	879,8	1,57	0,857	527,8	96,0	0,688
80,0	898,9	1,60	0,840	531,6	97,2	0,686
90,0	917,8	1,63	0,823	535,5	98,4	0,683
100,0	936,5	1,67	0,807	539,6	99,6	0,681
120,0	973,1	1,73	0,776	548,1	102,0	0,677
140,0	1008,8	1,79	0,749	557,0	104,5	0,673
160,0	1043,6	1,85	0,723	566,1	106,9	0,670
180,0	1077,5	1,90	0,699	575,4	109,3	0,667

$T=1500\text{ K}$

0,1	764,9	1,31	1,000	533,9	93,4	0,711
1,0	766,7	1,32	0,998	534,0	93,5	0,710
5,0	774,7	1,33	0,989	534,2	93,9	0,709
10,0	784,6	1,35	0,978	534,7	94,3	0,707
20,0	804,3	1,38	0,957	536,1	95,2	0,704
30,0	823,8	1,42	0,937	537,9	96,2	0,701
40,0	843,2	1,45	0,917	540,1	97,2	0,697
50,0	862,3	1,48	0,899	542,6	98,2	0,694
60,0	881,2	1,52	0,880	545,5	99,3	0,692
70,0	899,9	1,55	0,863	548,6	100,4	0,689
80,0	918,4	1,58	0,846	551,9	101,5	0,686
90,0	936,6	1,61	0,830	555,4	102,6	0,684
100,0	954,6	1,64	0,815	559,0	103,8	0,682
120,0	990,0	1,70	0,786	566,7	106,1	0,677
140,0	1024,6	1,75	0,759	574,7	108,4	0,673
160,0	1058,3	1,81	0,734	583,1	110,7	0,670
180,0	1091,2	1,86	0,711	591,6	113,0	0,667

$T=1750\text{ K}$

0,1	823,8	1,31	1,000	589,9	105,1	0,711
1,0	825,4	1,31	0,998	589,9	105,2	0,711
5,0	832,9	1,32	0,990	590,0	105,5	0,709
10,0	842,1	1,34	0,980	590,2	105,9	0,708

Aзот

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	860,4	1,36	0,961	591,0	106,6	0,704
30,0	878,5	1,39	0,943	592,1	107,5	0,701
40,0	896,4	1,42	0,925	593,5	108,3	0,698
50,0	914,1	1,45	0,908	595,3	109,2	0,695
60,0	931,5	1,48	0,892	597,3	110,2	0,693
70,0	948,8	1,50	0,876	599,5	111,1	0,690
80,0	965,9	1,53	0,861	602,0	112,1	0,687
90,0	982,8	1,56	0,846	604,6	113,1	0,685
100,0	999,5	1,58	0,832	607,3	114,1	0,683
120,0	1032,4	1,63	0,806	613,2	116,1	0,678
140,0	1064,5	1,68	0,781	619,6	118,1	0,674
160,0	1095,9	1,73	0,758	626,3	120,1	0,671
180,0	1126,6	1,77	0,737	633,2	122,2	0,667
200,0	1156,6	1,81	0,717	640,3	124,2	0,664
220,0	1186,0	1,85	0,699	647,5	126,3	0,662

$T=2000\text{ K}$

0,1	878,8	1,30	1,000	643,0	116,3	0,710
1,0	880,4	1,30	0,998	643,0	116,3	0,710
5,0	887,3	1,31	0,991	643,0	116,6	0,709
10,0	896,0	1,33	0,982	643,0	116,9	0,707
20,0	913,1	1,35	0,965	643,3	117,6	0,704
30,0	930,0	1,38	0,948	643,9	118,3	0,701
40,0	946,8	1,40	0,932	644,9	119,1	0,698
50,0	963,3	1,43	0,916	646,0	119,9	0,695
60,0	979,7	1,45	0,901	647,4	120,7	0,693
70,0	995,9	1,47	0,887	649,0	121,5	0,690
80,0	1011,9	1,50	0,873	650,8	122,4	0,688
90,0	1027,7	1,52	0,860	652,8	123,3	0,685
100,0	1043,4	1,54	0,847	654,9	124,1	0,683
120,0	1074,2	1,58	0,823	659,5	125,9	0,679
140,0	1104,4	1,63	0,800	664,5	127,8	0,675
160,0	1133,9	1,67	0,779	669,9	129,6	0,671
180,0	1162,9	1,71	0,759	675,5	131,4	0,668
200,0	1191,2	1,74	0,741	681,4	133,3	0,665
220,0	1219,0	1,78	0,723	687,5	135,1	0,662
240,0	1246,3	1,82	0,707	693,7	137,0	0,659
260,0	1273,0	1,85	0,691	700,0	138,8	0,657

$T=2250\text{ K}$

0,1	930,7	1,30	1,000	693,8	126,8	0,710
1,0	932,2	1,30	0,998	693,7	126,9	0,710
5,0	938,7	1,31	0,992	693,6	127,1	0,708
10,0	946,9	1,32	0,983	693,5	127,4	0,707
20,0	963,0	1,34	0,968	693,5	128,0	0,704
30,0	979,0	1,36	0,952	693,8	128,7	0,701
40,0	994,8	1,39	0,938	694,3	129,4	0,698
50,0	1010,4	1,41	0,923	695,0	130,1	0,696
60,0	1025,9	1,43	0,910	696,0	130,8	0,693
70,0	1041,2	1,45	0,897	697,1	131,5	0,691
80,0	1056,3	1,47	0,884	698,4	132,3	0,688
90,0	1071,2	1,49	0,872	699,9	133,1	0,686
100,0	1086,1	1,51	0,860	701,5	133,9	0,684
120,0	1115,2	1,55	0,837	705,1	135,5	0,680

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
140,0	1143,8	1,59	0,816	709,0	137,1	0,676
160,0	1171,8	1,62	0,796	713,4	138,8	0,672
180,0	1199,3	1,66	0,778	718,0	140,5	0,669
200,0	1226,2	1,69	0,760	722,9	142,1	0,666
220,0	1252,7	1,73	0,744	728,0	143,8	0,663
240,0	1278,7	1,76	0,728	733,2	145,5	0,660
260,0	1304,2	1,79	0,714	738,6	147,2	0,658
280,0	1329,2	1,82	0,700	744,1	148,9	0,655

$T=2500\text{ K}$

0,1	979,9	1,29	1,000	742,5	136,7	0,710
1,0	981,3	1,30	0,998	742,5	136,7	0,710
5,0	987,5	1,30	0,992	742,3	137,0	0,709
10,0	995,2	1,31	0,985	742,1	137,2	0,707
20,0	1010,6	1,33	0,970	741,8	137,8	0,705
30,0	1025,7	1,35	0,956	741,8	138,4	0,702
40,0	1040,7	1,37	0,943	742,1	139,0	0,699
50,0	1055,5	1,39	0,930	742,5	139,7	0,697
60,0	1070,2	1,41	0,917	743,1	140,3	0,694
70,0	1084,7	1,43	0,905	743,9	141,0	0,692
80,0	1099,1	1,45	0,893	744,8	141,7	0,690
90,0	1113,4	1,47	0,882	745,9	142,4	0,688
100,0	1127,4	1,49	0,871	747,1	143,1	0,685
120,0	1155,2	1,52	0,850	749,8	144,5	0,681
140,0	1182,5	1,55	0,830	753,0	146,0	0,678
160,0	1209,2	1,59	0,811	756,5	147,6	0,674
180,0	1235,4	1,62	0,794	760,3	149,1	0,671
200,0	1261,2	1,65	0,777	764,3	150,6	0,668
220,0	1286,5	1,68	0,762	768,6	152,2	0,665
240,0	1311,4	1,71	0,747	773,0	153,7	0,662
260,0	1335,8	1,74	0,733	777,6	155,3	0,660
280,0	1359,9	1,77	0,720	782,3	156,9	0,657
300,0	1383,5	1,80	0,707	787,2	158,4	0,655

3.2. Водород

Водород имеет две модификации, отличающиеся взаимной ориентацией ядерных спинов атомов: параводород ($p\text{-H}_2$) и ортоводород ($o\text{-H}_2$). В настоящей работе рассчитаны теплофизические свойства так называемого нормального водорода ($n\text{-H}_2$). Последний определяется как водород, находящийся в равновесном состоянии при высоких температурах и содержащий 75% $o\text{-H}_2$.

В [104] показано, что термодинамические поверхности параводорода и нормального водорода совпадают в координатах pVT при температурах выше температуры Бойля ($T > 110\text{ K}$). При температурах выше 500 K не только термические, но и калорические свойства становятся фактически одинаковыми.

В табл. 3.4 приводятся краткие сведения об экспериментальных работах, посвященных исследованию сжимаемости нормального водорода.

Среди экспериментальных работ о сжимаемости нормального водорода необходимо отметить работу Михельса с сотрудниками [108], в которой плотность измерена в широком интервале температур и давлений. Данные отличаются высокой точностью. Наименее точными являются данные [106]. Авторы оценивают погрешность своих данных в 0,1—0,2% при температуре до

Таблица 3.4. Работы по экспериментальному исследованию сжимаемости нормального водорода

ΔT, К	Δp, МПа	Авторы	Литература
273 — 473	0 — 10	Хольборн, Отто (1925)	[105]
273 — 673	0 — 100	Бартлетт, Капплес, Тремерн (1928)	[106]
273 — 573	2,5 — 100	Вибс, Гэдди (1938)	[107]
98 — 423	0 — 300	Михельс, де Грааф, Вассенаар (1959)	[108]

473,15 К, однако при температуре 573,15 К погрешность возрастает до 0,4 - 0,5% и при $T=673,15$ К она может быть еще и больше.

Для получения уравнения состояния нормального водорода вида (1.3) мы имели данные в интервале температур $T=98 \div 673$ К и давлений $p=0 \div 100$ МПа. Для обработки использованы данные из области параметров состояния, лежащей ниже критической изохоры нормального водорода. Предварительная обработка подтвердила низкую точность данных работы [106] при температурах выше 473,15 К, поэтому некоторые из них были исключены из используемого набора точек. Обработано 108 экспериментальных точек: 52 из работы [108], 21 из [106], 17 из [107] и 8 из [105]. Области экспериментальных данных перечисленных выше работ представлены на рис. 3.1; заштрихована область данных, использованных при получении уравнения состояния.

Из литературы [1, 109] известно, что для водорода существенное значение имеет квантовая поправка ко второму вириальному коэффициенту. Для потенциала Леннарда-Джонса (12-6) получено следующее выражение суммарного второго вириального коэффициента:

$$B^* = [B_{кл}^* + \lambda^* B_I^* + \lambda^{*4} B_{II}^* + \dots] \mp \lambda^* B_0^*,$$

где $B_{кл}^*$ — обычное классическое выражение для второго вириального коэффициента; B_I^* , B_{II}^* — квантовые поправки; B_0^* — второй вириальный коэффициент идеального газа; $\lambda^* = \lambda/\sigma = h/\sigma \sqrt{\mu\epsilon}$ — квантовомеханический параметр.

По данным [1] для водорода квантовомеханический параметр $\lambda^* = 1,729$, т. е. больше, чем для рассматривавшихся нами до сих пор газов; отсюда квантовая поправка имеет существенное значение, и ее необходимо учитывать.

Значения B_I^* , B_{II}^* , а также B_0^* рассчитаны и табулированы в работах [1, 109, 110]. В работе [110] рассчитаны значения приведенного второго вириального коэффициента с учетом квантовых поправок в интервале $T^* = 3 \div 100$.

Отметим, что в интересующей нас области температур составляющая квантовой поправки третьего порядка пренебрежимо мала, поэтому в расчетах учтены лишь две поправки: B_I^* и B_{II}^* . На рис. 3.2 представлены составляющие поправки к классическому второму вириальному коэффициенту. Зависимость классического приведенного второго вириального коэффициента и второго вириального коэффициента с учетом квантовой поправки от приведенной температуры показана на рис. 3.3. Как видно из рисунков, квантовая поправка имеет существенное значение лишь при $T^* < 10$.

Рассчитанный второй вириальный коэффициент для водорода с учетом квантовой поправки аппроксимирован полиномом по обратным степеням приведенной температуры (2.1) в интервале $T^* = 3 \div 100$.

Квантовая поправка к третьему вириальному коэффициенту еще не рассчитана.

Неаддитивный третий вириальный коэффициент водорода получен как сумма приведенного аддитивного третьего вириального коэффициента и неаддитивной поправки, рассчитанной для водорода. Результат представлен на

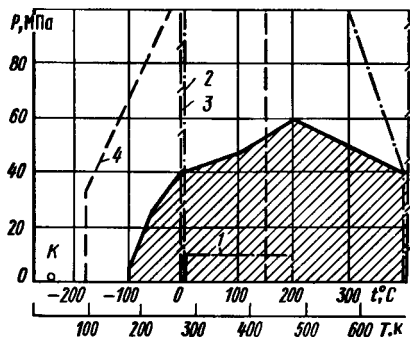


Рис. 3.1. Область обработки данных о сжимаемости газообразного водорода:

1— [105]; 2— [106]; 3— [107]; 4— [108]

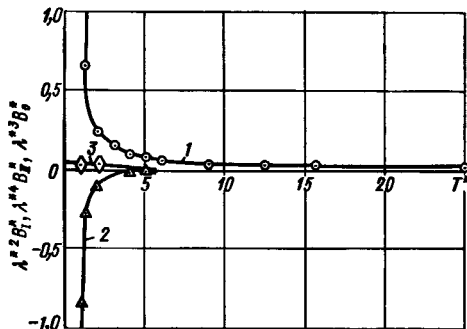


Рис. 3.2. Составляющие квантовой поправки ко второму вириальному коэффициенту водорода:

1— $\lambda^2 B_1^0$; 2— $\lambda^4 B_2^0$; 3— $\lambda^6 B_3^0$

рис. 3.4. Для приведенного третьего неаддитивного вириального коэффициента также получен аппроксимирующий полином (2.2) в интервале $T^* = 3 \div 100$.

При обработке экспериментальных данных о сжимаемости водорода использованы табулированные значения четвертого и пятого приведенных вириальных коэффициентов, рассчитанные до $T^* = 20$ в работе [5]. Однако для получения уравнения состояния водорода, имеющего малое значение глубины потенциальной ямы (ϵ/k), необходимы вириальные коэффициенты в более широком интервале приведенных температур.

Расчетная экстраполяция аппроксимирующих полиномов для D^* и E^* вида (2.3) и (2.4) с приведенными в § 2.1 константами до $T^* = 50$ дала значения: $D^* = 0,0524$ и $E^* = 0,00576$.

В результате графической экстраполяции D^* и E^* по данным [5] при $T^* = 50$ получены соответствующие значения 0,0523 и 0,0560, достаточно хорошо совпадающие с результатами экстраполяции аппроксимирующих уравнений.

Оценка влияния четвертого и пятого вириальных коэффициентов на значение сжимаемости водорода при $\rho = 0,02 \text{ г/см}^3$ показала, что вклад в уравнение состояния (1.3) от слагаемого $D^* b_0^3 \rho^3$ составляет около 0,2% и от $E^* b_0^4 \rho^4$ — примерно 0,01%.

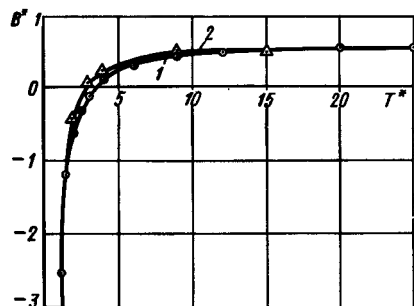


Рис. 3.3. Приведенный второй вириальный коэффициент для потенциала Леннарда-Джонса:

1— классический второй вириальный коэффициент; 2— с учетом квантовой поправки для водорода

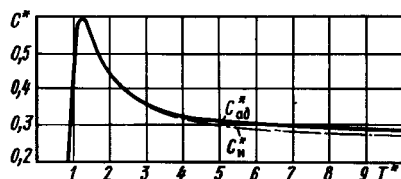


Рис. 3.4. Неаддитивный третий вириальный коэффициент водорода C_n^3

Последнее обстоятельство, а также сравнение полученных результатов экстраполяции показали, что имеющиеся уравнения для D^* и E^* в интервале до $T^* = 20$ вполне пригодны для экстраполяции их до $T^* = 50$.

Получены следующие значения констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для нормального водорода: $b_0 = 16,1158461 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $\epsilon/k = 33,9367963 \text{ К}$.

Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных полученным уравнением состояния составляет 0,11%, причем данные [108] описываются со средней квадратической погрешностью 0,1, данные [106] и [107] — 0,13 и данные [105] — 0,11%.

Единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для водорода получены методом переаппроксимации (§ 1.5). В обработку включены приведенное выше уравнение состояния и данные о вязкости и теплопроводности водорода при атмосферном давлении из работы [111].

Данные о вязкости и теплопроводности при атмосферном давлении обрабатывались соответственно по уравнению Энского (1.24) и уравнению Мейсона и Мончика (1.27). Константы аппроксимации комплекса $f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2,2)*}$ полиномом по обратным степеням приведенной температуры T^* , необходимые для расчета η_0 , даны в § 2.1. Зависимость $\beta_0(T^*)$, входящая в уравнение Мейсона и Мончика

для λ_0 представлена в виде полинома $\beta_0(T^*) = \sum_{i=1}^5 m_i (\epsilon/(kT))^i$.

Уравнения вязкости и теплопроводности при повышенном давлении определялись в виде вириальных уравнений (1.43) и (1.44). Аппроксимация комплексов $B_{\eta}^*/\Omega^{(2,2)*}$, $C_{\eta}^*/\Omega^{(2,2)*}$, $C_{\lambda}^*/\Omega^{(2,2)*}$ приведена в § 2.1. Второй теплопроводностный вириальный коэффициент водорода рассчитан и затем аппроксимирован полиномом по обратным степеням приведенной температуры:

$$B_{\lambda}^*/\Omega^{(2,2)*} = \sum_{j=1}^5 p_j (\epsilon/(kT))^j.$$

Таблицы теплофизических свойств нормального водорода рассчитаны в интервале температур 400–3000 К, максимальное давление на изотермах определяется предельной плотностью $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$.

Для расчета термодинамических свойств нормального водорода использованы таблицы идеально-газовых функций NBS (США), приведенные в [112]. За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. Табличные значения идеально-газовых функций аппроксимированы полиномами по обратным степеням температур (3.2) в интервале 400–3000 К. Получены следующие значения констант:

$\alpha_0 = 4,88680750 \cdot 10^0$	$\beta_0 = 5,25895584 \cdot 10^0$	$\gamma_0 = 3,10395917 \cdot 10^1$
$\alpha_1 = -4,83687825 \cdot 10^0$	$\beta_1 = -2,22704724 \cdot 10^0$	$\gamma_1 = -3,03682286 \cdot 10^1$
$\alpha_2 = 7,29911722 \cdot 10^0$	$\beta_2 = -2,26838816 \cdot 10^0$	$\gamma_2 = 4,05102029 \cdot 10^1$
$\alpha_3 = -6,04959435 \cdot 10^0$	$\beta_3 = 6,80095064 \cdot 10^0$	$\gamma_3 = -3,39202551 \cdot 10^1$
$\alpha_4 = 2,84537009 \cdot 10^0$	$\beta_4 = -6,10635429 \cdot 10^0$	$\gamma_4 = 1,65868425 \cdot 10^1$
$\alpha_5 = -7,12526622 \cdot 10^{-1}$	$\beta_5 = 2,74574754 \cdot 10^0$	$\gamma_5 = -4,33181187 \cdot 10^0$
$\alpha_6 = 7,36554078 \cdot 10^{-2}$	$\beta_6 = -6,29778642 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_6 = 4,65031968 \cdot 10^{-1}$
	$\beta_7 = 5,87785304 \cdot 10^{-2}$	

При получении единых констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) и расчете таблиц теплофизических свойств использованы следующие физические константы для водорода:

масса моля $\mu = 2,01594 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 4124,83 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 394,853 \text{ Дж/кг}$;

единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = 34,8852 \text{ К}$;

$b_0 = 15,7478 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Приводим константы полиномов, аппроксимирующих вириальные коэффициенты B^* , C_{η}^* , D^* и E^* и использованные для получения уравнения состояния водорода:

$$\begin{aligned}
a_0 &= 3,88461891 \cdot 10^{-1} & c_0 &= 5,60150563 \cdot 10^{-2} \\
a_1 &= 1,06950287 \cdot 10^1 & c_1 &= 7,12988822 \cdot 10^0 \\
a_2 &= -2,74953457 \cdot 10^2 & c_2 &= -1,16499133 \cdot 10^2 \\
a_3 &= 3,17586205 \cdot 10^3 & c_3 &= 1,13024739 \cdot 10^3 \\
a_4 &= -1,87855120 \cdot 10^4 & c_4 &= -6,57442808 \cdot 10^3 \\
a_5 &= 5,32828385 \cdot 10^4 & c_5 &= 2,21176166 \cdot 10^4 \\
a_6 &= -5,71213530 \cdot 10^4 & c_6 &= -3,94641898 \cdot 10^4 \\
& & c_7 &= 2,88067490 \cdot 10^4 \\
d_0 &= 2,50212469 \cdot 10^{-2} & e_0 &= -7,99684022 \cdot 10^{-3} \\
d_1 &= 1,51900944 \cdot 10^0 & e_1 &= 7,91478261 \cdot 10^{-1} \\
d_2 &= -8,06786698 \cdot 10^0 & e_2 &= -5,99482127 \cdot 10^0 \\
d_3 &= 2,38961138 \cdot 10^1 & e_3 &= 4,26004629 \cdot 10^1 \\
d_4 &= -5,45403437 \cdot 10^1 & e_4 &= -1,88313831 \cdot 10^2 \\
d_5 &= 9,25036101 \cdot 10^1 & e_5 &= 4,7015109710^2 \\
d_6 &= -9,55177058 \cdot 10^1 & e_6 &= -6,92035610 \cdot 10^2 \\
d_7 &= 5,70594052 \cdot 10^1 & e_7 &= 5,68607770 \cdot 10^2 \\
d_8 &= -1,71539946 \cdot 10^1 & e_8 &= -1,98570830 \cdot 10^2
\end{aligned}$$

Для расчета вязкости и теплопроводности использованы константы полиномов, приведенные в § 2.1. Константы аппроксимации β_0 и $B_\chi^*/\Omega^{(2,2)*}$ для нормального водорода приведены ниже:

$$\begin{aligned}
m_1 &= 4,39149 \cdot 10^4 & s_1 &= 4 & p_1 &= 3,35514 \cdot 10^2 & s_1 &= 2,0 \\
m_2 &= -1,13349 \cdot 10^4 & s_2 &= 3 & p_2 &= -2,02638 \cdot 10^1 & s_2 &= 1,0 \\
m_3 &= 1,08654 \cdot 10^3 & s_3 &= 2 & p_3 &= 4,48612 \cdot 10^0 & s_3 &= 0,5 \\
m_4 &= -4,62736 \cdot 10^1 & s_4 &= 1 & p_4 &= 1,61780 \cdot 10^{-1} & s_4 &= 0 \\
m_5 &= 2,11114 \cdot 10^0 & s_5 &= 0 & p_5 &= 4,70466 \cdot 10^{-7} & s_5 &= -1,0
\end{aligned}$$

Результаты расчета теплофизических свойств нормального водорода приводятся в табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5. Водород

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 500 \text{ К}$						
0,1	0,048	1,0004	7118,8	72,293	10,389	14,514
1,0	0,483	1,0040	7125,2	62,794	10,389	14,518
2,0	0,962	1,0080	7132,3	59,933	10,389	14,522
3,0	1,438	1,0120	7139,4	58,259	10,388	14,526
4,0	1,909	1,0160	7146,6	57,070	10,388	14,530
5,0	2,377	1,0200	7153,7	56,147	10,388	14,534
6,0	2,841	1,0240	7160,9	55,393	10,388	14,538
8,0	3,759	1,0320	7175,2	54,203	10,388	14,546
10,0	4,663	1,0400	7189,6	53,278	10,388	14,554
12,0	5,553	1,0480	7204,0	52,522	10,388	14,561
16,0	7,293	1,0639	7232,9	51,327	10,388	14,574
20,0	8,982	1,0797	7262,0	50,399	10,389	14,587
25,0	11,026	1,0995	7298,5	49,470	10,390	14,601
30,0	12,998	1,1192	7335,1	48,709	10,391	14,614
35,0	14,903	1,1389	7371,9	48,065	10,393	14,626
40,0	16,745	1,1584	7408,8	47,506	10,396	14,636
45,0	18,526	1,1779	7445,7	47,013	10,399	14,646
50,0	20,251	1,1973	7482,8	46,571	10,402	14,655
60,0	23,542	1,2359	7557,1	45,805	10,409	14,671
70,0	26,640	1,2742	7631,7	45,157	10,417	14,685
80,0	29,564	1,3122	7706,3	44,594	10,425	14,697

Водород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
----------	--------	----------	----------	----------	----------------------	----------------------

T = 600 K

0,1	0,040	1,0003	8572,3	74,954	10,422	14,547
1,0	0,403	1,0034	8579,1	65,456	10,424	14,551
2,0	0,803	1,0068	8586,7	62,596	10,425	14,555
3,0	1,200	1,0102	8594,2	60,922	10,427	14,560
4,0	1,595	1,0137	8601,8	59,734	10,428	14,564
5,0	1,987	1,0171	8609,4	58,813	10,430	14,569
6,0	2,376	1,0205	8617,0	58,059	10,432	14,573
8,0	3,147	1,0273	8632,1	56,870	10,435	14,581
10,0	3,908	1,0340	8647,3	55,947	10,438	14,589
12,0	4,659	1,0408	8662,5	55,192	10,441	14,597
16,0	6,133	1,0543	8692,9	54,000	10,448	14,613
20,0	7,569	1,0677	8723,3	53,075	10,454	14,627
25,0	9,316	1,0845	8761,4	52,148	10,463	14,645
30,0	11,010	1,1011	8799,5	51,390	10,471	14,661
35,0	12,655	1,1177	8837,7	50,749	10,480	14,676
40,0	14,252	1,1342	8875,9	50,192	10,489	14,691
45,0	15,805	1,1506	8914,1	49,701	10,498	14,705
50,0	17,315	1,1669	8952,3	49,261	10,506	14,718
60,0	20,215	1,1994	9028,8	48,499	10,524	14,743
70,0	22,968	1,2316	9105,2	47,854	10,542	14,765
80,0	25,587	1,2635	9181,5	47,295	10,561	14,786
90,0	28,082	1,2951	9257,7	46,800	10,579	14,805

T = 700 K

0,1	0,035	1,0003	10028,0	77,176	10,480	14,605
1,0	0,345	1,0030	10035,2	67,679	10,482	14,608
2,0	0,689	1,0059	10043,2	64,819	10,485	14,612
3,0	1,030	1,0089	10051,1	63,146	10,487	14,616
4,0	1,369	1,0119	10059,1	61,959	10,489	14,620
5,0	1,707	1,0148	10067,1	61,037	10,492	14,624
6,0	2,042	1,0178	10075,1	60,285	10,494	14,628
8,0	2,707	1,0237	10091,1	59,097	10,499	14,636
10,0	3,364	1,0295	10107,0	58,175	10,504	14,643
12,0	4,014	1,0354	10123,0	57,421	10,508	14,650
16,0	5,293	1,0471	10154,9	56,232	10,518	14,665
20,0	6,543	1,0587	10186,8	55,308	10,527	14,678
25,0	8,069	1,0732	10226,6	54,384	10,539	14,695
30,0	9,554	1,0876	10266,3	53,629	10,551	14,711
35,0	11,002	1,1020	10306,1	52,990	10,563	14,726
40,0	12,413	1,1162	10345,7	52,436	10,574	14,741
45,0	13,789	1,1304	10385,4	51,947	10,586	14,755
50,0	15,132	1,1445	10425,0	51,509	10,598	14,768
60,0	17,725	1,1725	10504,0	50,751	10,621	14,794
70,0	20,200	1,2003	10582,7	50,110	10,643	14,818
80,0	22,569	1,2278	10661,3	49,553	10,666	14,841
90,0	24,839	1,2551	10739,6	49,062	10,688	14,862
100,0	27,017	1,2821	10817,6	48,623	10,710	14,883

T = 800 K

0,1	0,030	1,0003	11493,4	79,140	10,571	14,695
1,0	0,302	1,0026	11500,9	69,643	10,573	14,698
2,0	0,603	1,0052	11509,3	66,784	10,576	14,702

Водород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
3,0	0,902	1,0078	11517,6	65,111	10,578	14,705
4,0	1,200	1,0104	11526,0	63,925	10,581	14,708
5,0	1,496	1,0130	11534,3	63,004	10,584	14,711
6,0	1,790	1,0156	11542,6	62,252	10,586	14,714
8,0	2,375	1,0208	11559,3	61,064	10,591	14,721
10,0	2,954	1,0260	11575,9	60,143	10,596	14,727
12,0	3,527	1,0312	11592,6	59,391	10,602	14,733
16,0	4,656	1,0415	11625,8	58,203	10,612	14,745
20,0	5,764	1,0517	11658,9	57,281	10,622	14,756
25,0	7,118	1,0645	11700,3	56,360	10,634	14,770
30,0	8,441	1,0771	11741,5	55,606	10,647	14,784
35,0	9,734	1,0897	11782,7	54,969	10,659	14,797
40,0	10,999	1,1023	11823,7	54,417	10,671	14,810
45,0	12,235	1,1147	11864,7	53,929	10,684	14,822
50,0	13,445	1,1271	11905,6	53,494	10,696	14,834
60,0	15,789	1,1517	11987,0	52,739	10,720	14,857
70,0	18,039	1,1761	12068,1	52,100	10,743	14,879
80,0	20,201	1,2003	12148,9	51,547	10,767	14,900
90,0	22,281	1,2242	12229,2	51,059	10,790	14,919
100,0	24,286	1,2480	12309,2	50,622	10,813	14,939
120,0	28,088	1,2948	12468,2	49,865	10,857	14,974
<i>T</i> = 900 K						
0,1	0,027	1,0002	12970,1	80,890	10,698	14,822
1,0	0,269	1,0023	12977,9	71,394	10,700	14,825
2,0	0,536	1,0047	12986,5	68,535	10,703	14,827
3,0	0,803	1,0070	12995,2	66,863	10,705	14,830
4,0	1,068	1,0093	13003,8	65,676	10,708	14,832
5,0	1,332	1,0116	13012,4	64,756	10,710	14,835
6,0	1,594	1,0139	13021,0	64,004	10,713	14,837
8,0	2,116	1,0186	13038,2	62,817	10,718	14,842
10,0	2,633	1,0232	13055,4	61,897	10,723	14,847
12,0	3,146	1,0278	13072,6	61,145	10,728	14,851
16,0	4,157	1,0369	13106,9	59,959	10,737	14,861
20,0	5,151	1,0461	13141,0	59,038	10,747	14,870
25,0	6,370	1,0574	13183,6	58,118	10,759	14,881
30,0	7,563	1,0687	13226,1	57,366	10,771	14,892
35,0	8,732	1,0799	13268,4	56,730	10,783	14,902
40,0	9,877	1,0910	13310,7	56,179	10,795	14,912
45,0	11,000	1,1021	13352,7	55,693	10,806	14,923
50,0	12,101	1,1132	13394,7	55,258	10,818	14,932
60,0	14,240	1,1351	13478,3	54,506	10,841	14,951
70,0	16,302	1,1568	13561,4	53,870	10,864	14,969
80,0	18,291	1,1783	13644,0	53,319	10,886	14,987
90,0	20,211	1,1996	13726,2	52,833	10,908	15,004
100,0	22,068	1,2208	13808,0	52,398	10,929	15,020
120,0	25,606	1,2625	13970,3	51,645	10,971	15,051
140,0	28,932	1,3036	14131,0	51,008	11,013	15,080
<i>T</i> = 1000 K						
0,1	0,024	1,0002	14460,5	82,463	10,859	14,983
1,0	0,242	1,0021	14468,5	72,967	10,861	14,985
5,0	1,200	1,0104	14503,8	66,330	10,870	14,992
10,0	2,375	1,0208	14547,9	63,472	10,881	15,001

Водород

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
20,0	4,657	1,0414	14635,5	60,616	10,904	15,018
30,0	6,851	1,0617	14722,5	58,945	10,926	15,035
40,0	8,965	1,0819	14808,9	57,761	10,947	15,051
50,0	11,003	1,1018	14894,7	56,842	10,969	15,066
60,0	12,972	1,1215	14979,9	56,091	10,990	15,081
70,0	14,875	1,1410	15064,7	55,457	11,010	15,095
80,0	16,716	1,1604	15148,9	54,908	11,031	15,109
90,0	18,500	1,1796	15232,6	54,423	11,051	15,123
100,0	20,229	1,1986	15315,8	53,990	11,070	15,136
120,0	23,536	1,2362	15481,0	53,240	11,109	15,161
140,0	26,661	1,2732	15644,3	52,606	11,147	15,185
160,0	29,620	1,3097	15806,1	52,056	11,183	15,208

$T=1100\text{ K}$

0,1	0,022	1,0002	15967,5	83,896	11,046	15,170
1,0	0,220	1,0019	15975,6	74,400	11,048	15,171
5,0	1,092	1,0095	16011,6	67,763	11,056	15,176
10,0	2,163	1,0189	16056,4	64,906	11,066	15,183
20,0	4,249	1,0375	16145,5	62,051	11,086	15,195
30,0	6,262	1,0560	16233,9	60,382	11,105	15,207
40,0	8,208	1,0742	16321,7	59,198	11,125	15,219
50,0	10,090	1,0923	16408,8	58,281	11,144	15,230
60,0	11,913	1,1102	16495,4	57,532	11,163	15,241
70,0	13,680	1,1279	16581,3	56,899	11,181	15,252
80,0	15,394	1,1455	16666,8	56,350	11,199	15,263
90,0	17,059	1,1629	16751,7	55,867	11,217	15,273
100,0	18,677	1,1802	16836,1	55,435	11,235	15,283
120,0	21,782	1,2143	17003,4	54,687	11,270	15,303
140,0	24,727	1,2480	17168,9	54,055	11,304	15,321
160,0	27,528	1,2812	17332,7	53,507	11,336	15,340

$T=1200\text{ K}$

0,1	0,020	1,0002	17493,7	85,217	11,250	15,374
1,0	0,202	1,0017	17501,9	75,721	11,252	15,375
5,0	1,002	1,0086	17538,3	69,085	11,259	15,378
10,0	1,986	1,0172	17583,7	66,228	11,268	15,383
20,0	3,907	1,0342	17673,8	63,374	11,285	15,391
30,0	5,767	1,0511	17763,2	61,706	11,303	15,400
40,0	7,569	1,0678	17852,0	60,523	11,320	15,408
50,0	9,318	1,0843	17940,1	59,607	11,337	15,416
60,0	11,015	1,1006	18027,6	58,858	11,353	15,424
70,0	12,664	1,1168	18114,5	58,226	11,370	15,432
80,0	14,268	1,1329	18200,8	57,678	11,386	15,439
90,0	15,829	1,1488	18286,6	57,196	11,402	15,447
100,0	17,349	1,1647	18371,9	56,764	11,418	15,454
120,0	20,274	1,1959	18540,9	56,018	11,448	15,469
140,0	23,060	1,2267	18708,1	55,387	11,479	15,483
160,0	25,717	1,2571	18873,4	54,841	11,508	15,497
180,0	28,257	1,2871	19037,2	54,360	11,537	15,511

$T=1300\text{ K}$

0,1	0,019	1,0002	19040,8	86,449	11,464	15,588
1,0	0,186	1,0016	19049,1	76,953	11,465	15,589

Водород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
5,0	0,925	1,0079	19085,8	70,317	11,472	15,591
10,0	1,836	1,0158	19131,5	67,461	11,479	15,593
20,0	3,617	1,0314	19222,3	64,607	11,495	15,599
30,0	5,345	1,0469	19312,4	62,940	11,510	15,604
40,0	7,023	1,0622	19401,9	61,758	11,525	15,610
50,0	8,656	1,0774	19490,6	60,842	11,540	15,615
60,0	10,244	1,0925	19578,8	60,094	11,555	15,621
70,0	11,790	1,1074	19666,4	59,462	11,569	15,626
80,0	13,297	1,1222	19753,3	58,915	11,584	15,631
90,0	14,766	1,1368	19839,8	58,433	11,598	15,637
100,0	16,199	1,1514	19925,7	58,002	11,612	15,642
120,0	18,964	1,1802	20095,9	57,257	11,639	15,652
140,0	21,606	1,2086	20264,3	56,627	11,666	15,662
160,0	24,133	1,2366	20430,9	56,082	11,692	15,673
180,0	26,556	1,2642	20595,8	55,601	11,717	15,683
200,0	28,882	1,2915	20759,1	55,172	11,742	15,693

T = 1400 K

0,1	0,017	1,0001	20609,8	87,609	11,681	15,805
1,0	0,173	1,0015	20618,1	78,113	11,683	15,806
5,0	0,860	1,0073	20655,0	71,477	11,688	15,807
10,0	1,707	1,0146	20700,9	68,621	11,695	15,808
20,0	3,366	1,0290	20792,2	65,767	11,709	15,811
30,0	4,980	1,0433	20882,7	64,100	11,722	15,815
40,0	6,551	1,0575	20972,5	62,918	11,735	15,818
50,0	8,082	1,0715	21061,8	62,003	11,748	15,821
60,0	9,574	1,0854	21150,3	61,255	11,761	15,824
70,0	11,029	1,0992	21238,3	60,624	11,774	15,828
80,0	12,450	1,1129	21325,7	60,077	11,787	15,831
90,0	13,837	1,1265	21412,6	59,595	11,799	15,834
100,0	15,193	1,1400	21498,9	59,164	11,811	15,838
120,0	17,815	1,1666	21670,1	58,420	11,836	15,845
140,0	20,326	1,1929	21839,3	57,791	11,859	15,852
160,0	22,735	1,2189	22006,7	57,246	11,882	15,859
180,0	25,050	1,2445	22172,5	56,767	11,905	15,866
200,0	27,278	1,2698	22336,6	56,338	11,927	15,873
220,0	29,425	1,2949	22499,2	55,950	11,949	15,880

T = 1500 K

0,1	0,016	1,0001	22200,9	88,706	11,898	16,022
1,0	0,161	1,0014	22209,2	79,210	11,899	16,022
5,0	0,803	1,0068	22246,2	72,575	11,904	16,022
10,0	1,595	1,0135	22292,2	69,719	11,910	16,023
20,0	3,148	1,0269	22383,7	66,865	11,922	16,024
30,0	4,662	1,0402	22474,4	65,198	11,933	16,025
40,0	6,138	1,0533	22564,5	64,016	11,945	16,027
50,0	7,579	1,0664	22653,9	63,101	11,957	16,028
60,0	8,986	1,0793	22742,8	62,354	11,968	16,030
70,0	10,361	1,0921	22831,0	61,722	11,979	16,032
80,0	11,704	1,1048	22918,7	61,176	11,990	16,034
90,0	13,019	1,1175	23005,8	60,694	12,001	16,035
100,0	14,305	1,1300	23092,4	60,264	12,012	16,037
120,0	16,797	1,1548	23264,1	59,519	12,034	16,042
140,0	19,190	1,1793	23433,9	58,891	12,055	16,046

Водород

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
160,0	21,491	1,2034	23601,9	58,347	12,075	16,050
180,0	23,707	1,2273	23768,2	57,867	12,095	16,055
200,0	25,844	1,2509	23932,9	57,439	12,115	16,060
220,0	27,907	1,2743	24096,2	57,051	12,134	16,065
240,0	29,902	1,2974	24257,9	56,698	12,153	16,070

$T=1750$ K

0,1	0,014	1,0001	26272,8	91,225	12,415	16,539
1,0	0,138	1,0011	26281,1	81,729	12,415	16,539
5,0	0,689	1,0057	26317,9	75,094	12,419	16,538
10,0	1,370	1,0114	26363,9	72,238	12,423	16,537
20,0	2,709	1,0227	26455,2	69,384	12,432	16,535
30,0	4,020	1,0339	26545,9	67,717	12,441	16,533
40,0	5,303	1,0450	26636,0	66,535	12,449	16,532
50,0	6,560	1,0561	26725,4	65,620	12,458	16,531
60,0	7,791	1,0670	26814,3	64,872	12,466	16,530
70,0	8,998	1,0779	26902,6	64,241	12,475	16,529
80,0	10,181	1,0887	26990,4	63,695	12,483	16,528
90,0	11,342	1,0994	27077,6	63,213	12,491	16,527
100,0	12,482	1,1100	27164,4	62,783	12,499	16,527
120,0	14,699	1,1311	27336,4	62,039	12,515	16,526
140,0	16,839	1,1519	27506,6	61,410	12,530	16,526
160,0	18,907	1,1725	27675,1	60,867	12,546	16,525
180,0	20,907	1,1929	27842,0	60,388	12,561	16,526
200,0	22,845	1,2130	28007,3	59,960	12,576	16,526
220,0	24,723	1,2329	28171,2	59,573	12,590	16,527
240,0	26,546	1,2526	28333,7	59,219	12,604	16,528
260,0	28,317	1,2722	28494,8	58,895	12,618	16,529

$T=2000$ K

0,1	0,012	1,0001	30468,5	93,476	12,881	17,005
1,0	0,121	1,0010	30476,8	83,980	12,882	17,005
5,0	0,603	1,0049	30513,3	77,344	12,884	17,004
10,0	1,201	1,0098	30558,9	74,488	12,888	17,002
20,0	2,378	1,0196	30649,6	71,634	12,894	16,999
30,0	3,534	1,0292	30739,7	69,967	12,901	16,996
40,0	4,668	1,0388	30829,2	68,785	12,907	16,993
50,0	5,782	1,0484	30918,1	67,869	12,914	16,990
60,0	6,876	1,0578	31006,5	67,122	12,920	16,987
70,0	7,952	1,0672	31094,4	66,490	12,926	16,985
80,0	9,009	1,0766	31181,8	65,943	12,932	16,983
90,0	10,048	1,0858	31268,7	65,462	12,938	16,981
100,0	11,071	1,0951	31355,1	65,031	12,944	16,979
120,0	13,067	1,1133	31526,5	64,287	12,956	16,975
140,0	15,001	1,1314	31696,3	63,658	12,968	16,972
160,0	16,878	1,1493	31864,4	63,114	12,980	16,969
180,0	18,700	1,1670	32031,0	62,635	12,991	16,967
200,0	20,470	1,1845	32196,1	62,207	13,003	16,965
220,0	22,192	1,2018	32359,8	61,820	13,014	16,963
240,0	23,869	1,2190	32522,1	61,467	13,025	16,961
260,0	25,502	1,2360	32683,2	61,142	13,035	16,960
280,0	27,093	1,2529	32843,1	60,841	13,046	16,959
300,0	28,646	1,2696	33001,8	60,562	13,056	16,958

Водород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
----------	--------	----------	----------	----------	----------------------	----------------------

T = 2250 K

0,1	0,011	1,0001	34772,0	95,500	13,292	17,416
1,0	0,108	1,0009	34780,1	86,004	13,292	17,416
5,0	0,537	1,0043	34816,3	79,368	13,295	17,414
10,0	1,068	1,0086	34861,4	76,512	13,297	17,412
20,0	2,119	1,0171	34951,2	73,658	13,302	17,408
30,0	3,152	1,0256	35040,4	71,990	13,307	17,404
40,0	4,169	1,0340	35129,1	70,807	13,312	17,401
50,0	5,169	1,0424	35217,3	69,891	13,317	17,397
60,0	6,154	1,0507	35304,9	69,143	13,322	17,394
70,0	7,123	1,0590	35392,1	68,511	13,326	17,391
80,0	8,078	1,0672	35478,8	67,965	13,331	17,388
90,0	9,019	1,0754	35565,1	67,483	13,336	17,385
100,0	9,946	1,0835	35650,9	67,052	13,340	17,383
120,0	11,760	1,0996	35821,3	66,307	13,350	17,378
140,0	13,524	1,1155	35990,0	65,678	13,359	17,373
160,0	15,241	1,1313	36157,3	65,133	13,368	17,369
180,0	16,913	1,1469	36323,0	64,654	13,377	17,365
200,0	18,542	1,1624	36487,4	64,225	13,385	17,361
220,0	20,130	1,1777	36650,4	63,838	13,394	17,358
240,0	21,681	1,1929	36812,2	63,484	13,402	17,355
260,0	23,195	1,2080	36972,8	63,160	13,411	17,352
280,0	24,674	1,2229	37132,2	62,859	13,419	17,350
300,0	26,119	1,2377	37290,4	62,579	13,427	17,347
350,0	29,598	1,2743	37681,4	61,955	13,447	17,342

T = 2500 K

0,1	0,010	1,0001	39167,2	97,327	13,651	17,775
1,0	0,097	1,0008	39175,2	87,831	13,651	17,774
5,0	0,483	1,0038	39211,0	81,194	13,652	17,773
10,0	0,963	1,0076	39255,6	78,338	13,654	17,770
20,0	1,911	1,0152	39344,3	75,483	13,658	17,766
30,0	2,845	1,0228	39432,5	73,815	13,662	17,762
40,0	3,766	1,0303	39520,3	72,632	13,666	17,758
50,0	4,673	1,0377	39607,5	71,716	13,670	17,755
60,0	5,568	1,0451	39694,3	70,967	13,673	17,751
70,0	6,451	1,0525	39780,7	70,335	13,677	17,748
80,0	7,321	1,0598	39866,6	69,788	13,681	17,744
90,0	8,180	1,0671	39952,1	69,306	13,685	17,741
100,0	9,028	1,0743	40037,2	68,874	13,688	17,738
120,0	10,690	1,0887	40206,3	68,129	13,695	17,732
140,0	12,311	1,1029	40373,7	67,499	13,703	17,727
160,0	13,893	1,1170	40539,8	66,955	13,710	17,722
180,0	15,436	1,1309	40704,5	66,475	13,717	17,717
200,0	16,944	1,1448	40867,9	66,045	13,723	17,713
220,0	18,418	1,1585	41030,0	65,658	13,730	17,709
240,0	19,859	1,1721	41190,9	65,304	13,737	17,705
260,0	21,269	1,1856	41350,6	64,979	13,744	17,701
280,0	22,649	1,1990	41509,3	64,678	13,750	17,698
300,0	24,001	1,2123	41666,8	64,398	13,757	17,695
350,0	27,263	1,2451	42056,3	63,773	13,772	17,688

Таблица 3.6. Водород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

$T = 500 \text{ K}$						
0,1	1698,0	1,40	1,000	126,1	276,6	0,662
1,0	1704,4	1,40	0,997	126,1	277,0	0,661
2,0	1711,4	1,41	0,993	126,1	277,4	0,660
3,0	1718,5	1,42	0,990	126,2	277,9	0,659
4,0	1725,6	1,42	0,986	126,2	278,4	0,659
5,0	1732,6	1,43	0,983	126,2	278,8	0,658
6,0	1739,6	1,43	0,980	126,3	279,3	0,657
8,0	1753,6	1,45	0,973	126,3	280,2	0,656
10,0	1767,6	1,46	0,966	126,4	281,1	0,655
12,0	1781,6	1,47	0,960	126,5	282,1	0,653
16,0	1809,3	1,49	0,947	126,8	284,0	0,651
20,0	1836,8	1,52	0,935	127,1	285,9	0,649
25,0	1871,0	1,54	0,919	127,5	288,3	0,646
30,0	1904,9	1,57	0,905	128,0	290,7	0,643
35,0	1938,4	1,60	0,890	128,5	293,2	0,641
40,0	1971,7	1,63	0,876	129,1	295,6	0,639
45,0	2004,6	1,65	0,863	129,7	298,1	0,637
50,0	2037,3	1,68	0,850	130,4	300,6	0,636
60,0	2101,6	1,73	0,825	131,7	305,5	0,633
70,0	2164,8	1,78	0,801	133,2	310,4	0,630
80,0	2226,7	1,83	0,779	134,7	315,2	0,628

$T = 600 \text{ K}$						
0,1	1859,1	1,40	1,000	141,9	312,3	0,661
1,0	1865,0	1,40	0,997	141,9	312,6	0,660
2,0	1871,4	1,41	0,994	141,9	313,0	0,660
3,0	1877,9	1,41	0,991	141,9	313,4	0,659
4,0	1884,4	1,42	0,988	141,9	313,8	0,659
5,0	1890,8	1,42	0,985	141,9	314,2	0,658
6,0	1897,3	1,43	0,982	141,9	314,6	0,657
8,0	1910,1	1,44	0,976	142,0	315,4	0,656
10,0	1922,9	1,45	0,970	142,0	316,1	0,655
12,0	1935,6	1,45	0,965	142,1	316,9	0,654
16,0	1961,0	1,47	0,953	142,2	318,5	0,652
20,0	1986,1	1,49	0,942	142,4	320,2	0,650
25,0	2017,2	1,52	0,929	142,6	322,2	0,648
30,0	2048,1	1,54	0,916	142,9	324,3	0,646
35,0	2078,6	1,56	0,903	143,3	326,3	0,644
40,0	2108,9	1,58	0,891	143,6	328,4	0,643
45,0	2138,8	1,61	0,879	144,0	330,5	0,641
50,0	2168,5	1,63	0,868	144,5	332,6	0,639
60,0	2227,0	1,67	0,845	145,5	336,8	0,637
70,0	2284,4	1,71	0,825	146,5	341,0	0,634
80,0	2340,8	1,75	0,805	147,6	345,2	0,632
90,0	2396,1	1,79	0,786	148,8	349,3	0,631

$T = 700 \text{ K}$						
0,1	2006,4	1,39	1,000	156,7	346,1	0,661
1,0	2011,8	1,40	0,997	156,7	346,4	0,661
2,0	2017,8	1,40	0,994	156,7	346,7	0,661
3,0	2023,8	1,41	0,992	156,7	347,0	0,660
4,0	2029,7	1,41	0,989	156,7	347,4	0,660

Bodopod

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
5,0	2035,7	1,41	0,986	156,7	347,7	0,659
6,0	2041,6	1,42	0,984	156,7	348,0	0,659
8,0	2053,5	1,43	0,978	156,7	348,7	0,658
10,0	2065,3	1,44	0,973	156,7	394,4	0,657
12,0	2077,0	1,44	0,968	156,7	350,1	0,656
16,0	2100,3	1,46	0,958	156,8	351,5	0,654
20,0	2123,5	1,48	0,948	156,9	352,9	0,653
25,0	2152,2	1,49	0,936	157,0	354,7	0,651
30,0	2180,6	1,51	0,924	157,2	356,4	0,649
35,0	2208,7	1,53	0,913	157,4	358,2	0,647
40,0	2236,5	1,55	0,902	157,7	360,0	0,645
45,0	2264,1	1,57	0,891	157,9	361,9	0,644
50,0	2291,4	1,59	0,880	158,2	363,7	0,643
60,0	2345,3	1,62	0,860	158,9	367,4	0,640
70,0	2398,2	1,66	0,841	159,7	371,0	0,638
80,0	2450,2	1,69	0,823	160,5	374,7	0,636
90,0	2501,2	1,73	0,806	161,4	378,4	0,634
100,0	2551,4	1,76	0,790	162,4	382,0	0,633

$T=800\text{ K}$

0,1	2142,2	1,39	1,000	170,8	379,3	0,662
1,0	2147,3	1,39	0,997	170,8	379,6	0,661
2,0	2152,8	1,40	0,995	170,8	379,9	0,661
3,0	2158,4	1,40	0,992	170,8	380,2	0,661
4,0	2163,9	1,40	0,990	170,8	380,5	0,660
5,0	2169,4	1,41	0,988	170,8	380,8	0,660
6,0	2175,0	1,41	0,985	170,7	381,1	0,659
8,0	2186,0	1,42	0,980	170,7	381,7	0,658
10,0	2196,9	1,43	0,975	170,7	382,3	0,658
12,0	2207,8	1,43	0,971	170,7	382,9	0,657
16,0	2229,5	1,45	0,961	170,7	384,1	0,655
20,0	2251,0	1,46	0,952	170,7	385,4	0,654
25,0	2277,6	1,48	0,941	170,8	386,9	0,652
30,0	2304,0	1,49	0,930	170,9	388,5	0,650
35,0	2330,1	1,51	0,920	171,1	390,1	0,649
40,0	2356,0	1,53	0,910	171,2	391,7	0,647
45,0	2381,6	1,54	0,900	171,4	393,3	0,646
50,0	2407,0	1,56	0,890	171,6	394,9	0,645
60,0	2457,1	1,59	0,872	172,1	398,2	0,642
70,0	2506,3	1,62	0,854	172,6	401,5	0,640
80,0	2554,7	1,65	0,837	173,3	404,7	0,638
90,0	2602,3	1,68	0,821	174,0	408,0	0,636
100,0	2649,1	1,70	0,806	174,7	411,3	0,635
120,0	2740,6	1,76	0,778	176,3	417,8	0,632

$T=900\text{ K}$

0,1	2268,3	1,39	1,000	184,3	412,8	0,662
1,0	2273,0	1,39	0,998	184,3	413,0	0,661
2,0	2278,2	1,39	0,995	184,3	413,3	0,661
3,0	2283,4	1,39	0,993	184,2	413,6	0,661
4,0	2288,6	1,40	0,991	184,2	413,8	0,660
5,0	2293,7	1,40	0,989	184,2	414,1	0,660
6,0	2298,9	1,40	0,986	184,2	414,4	0,660

Водород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
8,0	2309,2	1,41	0,982	184,2	414,9	0,659
10,0	2319,4	1,42	0,977	184,1	415,4	0,658
12,0	2329,6	1,42	0,973	184,1	416,0	0,657
16,0	2349,8	1,43	0,964	184,1	417,1	0,656
20,0	2369,9	1,45	0,956	184,1	418,2	0,654
25,0	2394,8	1,46	0,946	184,1	419,6	0,653
30,0	2419,5	1,48	0,936	184,1	421,0	0,651
35,0	2443,9	1,49	0,926	184,2	422,5	0,650
40,0	2468,1	1,50	0,917	184,3	423,9	0,648
45,0	2492,1	1,52	0,908	184,4	425,4	0,647
50,0	2515,9	1,53	0,899	184,6	426,8	0,646
60,0	2562,8	1,56	0,881	184,9	429,7	0,643
70,0	2609,0	1,59	0,865	185,3	432,7	0,641
80,0	2654,4	1,61	0,849	185,8	435,7	0,639
90,0	2699,1	1,64	0,834	186,3	438,6	0,637
100,0	2743,1	1,66	0,820	186,9	441,6	0,636
120,0	2829,2	1,71	0,793	188,1	447,5	0,633
140,0	2912,8	1,75	0,769	189,6	453,5	0,630

$T=1000\text{ K}$

0,1	2386,0	1,38	1,000	197,3	446,6	0,662
1,0	2390,4	1,38	0,998	197,2	446,8	0,662
5,0	2409,9	1,39	0,989	197,1	447,8	0,660
10,0	2434,0	1,41	0,979	197,0	449,0	0,658
20,0	2481,5	1,43	0,959	196,9	451,5	0,655
30,0	2528,1	1,46	0,941	196,9	454,1	0,652
40,0	2573,9	1,48	0,923	197,0	456,7	0,649
50,0	2618,9	1,51	0,906	197,1	459,3	0,647
60,0	2663,1	1,53	0,890	197,3	462,0	0,644
70,0	2706,7	1,56	0,874	197,6	464,7	0,642
80,0	2749,5	1,58	0,860	198,0	467,4	0,640
90,0	2791,8	1,60	0,846	198,4	470,1	0,638
100,0	2833,4	1,62	0,832	198,8	472,8	0,636
120,0	2914,8	1,67	0,807	199,8	478,3	0,633
140,0	2994,1	1,71	0,783	201,0	483,8	0,631
160,0	3071,4	1,75	0,762	202,3	489,2	0,629

$T=1100\text{ K}$

0,1	2496,6	1,37	1,000	209,7	480,7	0,662
1,0	2500,7	1,38	0,998	209,7	480,9	0,662
5,0	2519,1	1,39	0,990	209,6	481,8	0,660
10,0	2541,8	1,40	0,981	209,5	482,9	0,659
20,0	2586,7	1,42	0,962	209,3	485,2	0,656
30,0	2630,7	1,44	0,945	209,3	487,6	0,653
40,0	2674,0	1,47	0,928	209,3	490,0	0,650
50,0	2716,6	1,49	0,912	209,3	492,4	0,647
60,0	2758,5	1,51	0,897	209,5	494,9	0,645
70,0	2799,8	1,53	0,883	209,7	497,3	0,643
80,0	2840,5	1,55	0,869	209,9	499,8	0,641
90,0	2880,6	1,57	0,856	210,2	502,3	0,639
100,0	2920,1	1,59	0,843	210,6	504,8	0,637
120,0	2997,6	1,63	0,819	211,4	509,9	0,634
140,0	3073,1	1,67	0,796	212,3	514,9	0,632
160,0	3146,7	1,70	0,776	213,4	520,0	0,629

Водород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=1200\text{ K}$						
0,1	2601,1	1,37	1,000	221,8	515,0	0,662
1,0	2605,1	1,37	0,998	221,8	515,2	0,662
5,0	2622,4	1,38	0,991	221,7	516,0	0,661
10,0	2644,0	1,39	0,982	221,6	517,1	0,659
20,0	2686,5	1,41	0,965	221,4	519,2	0,656
30,0	2728,3	1,43	0,949	221,2	521,4	0,653
40,0	2769,4	1,45	0,933	221,2	523,6	0,651
50,0	2809,9	1,47	0,918	221,2	525,9	0,649
60,0	2849,7	1,49	0,904	221,3	528,1	0,646
70,0	2889,0	1,51	0,890	221,4	530,4	0,644
80,0	2927,8	1,53	0,877	221,6	532,7	0,642
90,0	2966,0	1,55	0,865	221,8	535,1	0,640
100,0	3003,7	1,57	0,853	222,1	537,4	0,639
120,0	3077,6	1,60	0,830	222,7	542,1	0,636
140,0	3149,8	1,63	0,808	223,5	546,8	0,633
160,0	3220,3	1,67	0,788	224,4	551,5	0,630
180,0	3289,2	1,70	0,770	225,3	556,3	0,628
$T=1300\text{ K}$						
0,1	2700,5	1,36	1,000	233,6	549,4	0,663
1,0	2704,2	1,36	0,998	233,5	549,6	0,662
5,0	2720,8	1,37	0,992	233,4	550,4	0,661
10,0	2741,2	1,38	0,983	233,3	551,4	0,660
20,0	2781,7	1,40	0,967	233,1	553,4	0,657
30,0	2821,5	1,42	0,952	232,9	555,4	0,654
40,0	2860,7	1,44	0,937	232,8	557,5	0,652
50,0	2899,3	1,46	0,923	232,8	559,6	0,650
60,0	2937,3	1,47	0,910	232,8	561,7	0,647
70,0	2974,9	1,49	0,897	232,9	563,8	0,645
80,0	3011,9	1,51	0,885	233,0	566,0	0,643
90,0	3048,4	1,52	0,873	233,2	568,2	0,642
100,0	3084,5	1,54	0,861	233,4	570,3	0,640
120,0	3155,3	1,57	0,839	233,8	574,7	0,637
140,0	3224,5	1,60	0,819	234,5	579,2	0,634
160,0	3292,2	1,63	0,800	235,2	583,6	0,632
180,0	3358,4	1,66	0,782	236,0	588,0	0,629
200,0	3423,2	1,69	0,765	236,9	592,5	0,627
$T=1400\text{ K}$						
0,1	2795,5	1,35	1,000	245,0	583,9	0,663
1,0	2799,1	1,35	0,998	245,0	584,0	0,663
5,0	2814,8	1,36	0,992	244,8	584,8	0,662
10,0	2834,4	1,37	0,984	244,7	585,7	0,660
20,0	2873,0	1,39	0,969	244,5	587,6	0,658
30,0	2911,0	1,41	0,955	244,3	589,5	0,655
40,0	2948,5	1,42	0,941	244,2	591,4	0,653
50,0	2985,4	1,44	0,928	244,1	593,4	0,651
60,0	3021,8	1,46	0,915	244,1	595,4	0,649
70,0	3057,8	1,47	0,903	244,1	597,4	0,647
80,0	3093,3	1,49	0,892	244,2	599,4	0,645
90,0	3128,3	1,50	0,880	244,3	601,4	0,643
100,0	3162,9	1,52	0,869	244,4	603,5	0,641

Водород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
120,0	3231,0	1,55	0,848	244,8	607,5	0,638
140,0	3297,5	1,58	0,829	245,3	611,8	0,636
160,0	3362,6	1,61	0,811	245,9	616,0	0,633
180,0	3426,4	1,63	0,793	246,6	620,2	0,631
200,0	3488,9	1,66	0,777	247,3	624,4	0,629
220,0	3550,2	1,69	0,762	248,1	628,5	0,627

$T=1500$ K

0,1	2886,7	1,35	1,000	256,1	618,2	0,664
1,0	2890,1	1,35	0,999	256,1	618,4	0,664
5,0	2905,2	1,36	0,993	256,0	619,1	0,662
10,0	2923,9	1,36	0,985	255,8	620,0	0,661
20,0	2960,9	1,38	0,971	255,6	621,7	0,659
30,0	2997,3	1,40	0,958	255,4	623,5	0,656
40,0	3033,2	1,41	0,945	255,2	625,4	0,654
50,0	3068,7	1,43	0,932	255,1	627,2	0,652
60,0	3103,6	1,44	0,920	255,1	629,1	0,650
70,0	3138,2	1,46	0,909	255,1	631,0	0,648
80,0	3172,3	1,47	0,898	255,1	632,9	0,646
90,0	3206,0	1,49	0,887	255,1	634,8	0,644
100,0	3239,3	1,50	0,876	255,2	636,7	0,643
120,0	3304,3	1,53	0,857	255,5	640,6	0,640
140,0	3368,9	1,56	0,838	255,9	644,6	0,637
160,0	3431,7	1,58	0,820	256,4	648,5	0,635
180,0	3493,3	1,61	0,804	257,0	652,5	0,632
200,0	3553,7	1,63	0,788	257,6	656,5	0,630
220,0	3613,0	1,66	0,773	258,3	660,5	0,628
240,0	3671,2	1,68	0,759	259,1	664,4	0,627

$T=1750$ K

0,1	3101,2	1,33	1,000	282,9	703,4	0,665
1,0	3104,3	1,33	0,999	282,8	703,6	0,665
5,0	3117,9	1,34	0,994	282,7	704,2	0,664
10,0	3134,8	1,35	0,987	282,6	704,9	0,663
20,0	3168,3	1,36	0,975	282,3	706,5	0,661
30,0	3201,4	1,37	0,964	282,0	708,1	0,659
40,0	3234,1	1,39	0,952	281,9	709,7	0,657
50,0	3266,4	1,40	0,942	281,7	711,3	0,655
60,0	3298,3	1,41	0,931	281,6	713,0	0,653
70,0	3329,8	1,43	0,921	281,5	714,6	0,651
80,0	3361,0	1,44	0,911	281,4	716,3	0,649
90,0	3391,9	1,45	0,901	281,4	718,0	0,648
100,0	3422,4	1,46	0,892	281,4	719,7	0,646
120,0	3482,5	1,49	0,874	281,5	723,1	0,643
140,0	3541,5	1,51	0,857	281,7	726,6	0,641
160,0	3599,4	1,53	0,841	282,0	730,1	0,638
180,0	3656,2	1,55	0,826	282,3	733,6	0,636
200,0	3712,1	1,57	0,812	282,8	737,1	0,634
220,0	3767,1	1,59	0,798	283,2	740,6	0,632
240,0	3821,1	1,61	0,785	283,8	744,2	0,630
260,0	3874,4	1,63	0,773	284,4	747,7	0,629

$T=2000$ K

0,1	3300,3	1,32	1,000	308,3	787,0	0,666
-----	--------	------	-------	-------	-------	-------

Водород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
1,0	3303,1	1,32	0,999	308,3	787,2	0,666
5,0	3315,6	1,33	0,994	308,1	787,7	0,665
10,0	3331,1	1,33	0,989	308,0	788,4	0,664
20,0	3361,9	1,34	0,979	307,7	789,8	0,662
30,0	3392,3	1,36	0,968	307,4	791,2	0,660
40,0	3422,4	1,37	0,958	307,2	792,7	0,659
50,0	3452,1	1,38	0,949	307,0	794,1	0,657
60,0	3481,6	1,39	0,939	306,9	795,6	0,655
70,0	3510,7	1,40	0,930	306,7	797,1	0,654
80,0	3539,5	1,41	0,922	306,6	798,6	0,652
90,0	3568,1	1,42	0,913	306,6	800,1	0,651
100,0	3596,4	1,43	0,905	306,5	801,6	0,649
120,0	3652,2	1,45	0,889	306,5	804,7	0,646
140,0	3707,0	1,47	0,873	306,5	807,8	0,644
160,0	3760,8	1,49	0,859	306,6	810,9	0,642
180,0	3813,8	1,51	0,845	306,8	814,1	0,639
200,0	3866,0	1,53	0,832	307,1	817,2	0,637
220,0	3917,4	1,55	0,819	307,4	820,4	0,636
240,0	3968,0	1,57	0,807	307,8	823,6	0,634
260,0	4017,9	1,58	0,795	308,2	826,8	0,632
280,0	4067,1	1,60	0,784	308,6	830,0	0,631
300,0	4115,6	1,62	0,774	309,1	833,3	0,629

$T=2250\text{ K}$

0,1	3487,3	1,31	1,000	332,6	868,8	0,667
1,0	3489,9	1,31	0,999	332,6	868,9	0,667
5,0	3501,4	1,32	0,995	332,5	869,4	0,666
10,0	3515,8	1,32	0,990	332,3	870,0	0,665
20,0	3544,4	1,33	0,981	332,0	871,3	0,663
30,0	3572,6	1,34	0,972	331,7	872,6	0,662
40,0	3600,6	1,35	0,963	331,5	873,9	0,660
50,0	3628,3	1,36	0,955	331,3	875,3	0,659
60,0	3655,7	1,37	0,946	331,1	876,6	0,657
70,0	3682,8	1,38	0,938	330,9	878,0	0,656
80,0	3709,7	1,39	0,930	330,8	879,3	0,654
90,0	3736,4	1,40	0,922	330,7	880,7	0,653
100,0	3762,8	1,41	0,915	330,6	882,1	0,651
120,0	3815,0	1,43	0,900	330,5	884,9	0,649
140,0	3866,4	1,44	0,886	330,4	887,7	0,647
160,0	3916,9	1,46	0,873	330,4	890,5	0,644
180,0	3966,7	1,48	0,860	330,5	893,4	0,642
200,0	4015,8	1,50	0,848	330,6	896,3	0,640
220,0	4064,1	1,51	0,837	330,8	899,2	0,639
240,0	4111,8	1,53	0,825	331,0	902,1	0,637
260,0	4158,9	1,54	0,814	331,3	905,0	0,635
280,0	4205,4	1,56	0,804	331,6	908,0	0,634
300,0	4251,3	1,57	0,794	332,0	910,9	0,632
350,0	4363,6	1,61	0,770	333,1	918,3	0,629

$T=2500\text{ K}$

0,1	3664,4	1,30	1,000	356,0	948,6	0,667
1,0	3666,9	1,30	0,999	356,0	948,7	0,667
5,0	3677,7	1,31	0,996	355,9	949,1	0,666

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
10,0	3691,1	1,31	0,991	355,7	949,7	0,666
20,0	3717,8	1,32	0,983	355,4	950,9	0,664
30,0	3744,2	1,33	0,975	355,1	952,1	0,663
40,0	3770,4	1,34	0,967	354,9	953,3	0,661
50,0	3796,4	1,35	0,959	354,7	954,5	0,660
60,0	3822,1	1,36	0,952	354,4	955,8	0,658
70,0	3847,6	1,36	0,944	354,3	957,0	0,657
80,0	3872,9	1,37	0,937	354,1	958,3	0,656
90,0	3898,0	1,38	0,930	353,9	959,5	0,654
100,0	3922,8	1,39	0,923	353,8	960,8	0,653
120,0	3972,0	1,41	0,910	353,6	963,4	0,651
140,0	4020,4	1,42	0,897	353,5	966,0	0,649
160,0	4068,1	1,44	0,885	353,4	968,6	0,647
180,0	4115,2	1,45	0,873	353,4	971,2	0,645
200,0	4161,6	1,47	0,862	353,4	973,9	0,643
220,0	4207,4	1,48	0,851	353,5	976,6	0,641
240,0	4252,6	1,50	0,841	353,6	979,2	0,639
260,0	4297,3	1,51	0,831	353,8	981,9	0,638
280,0	4341,4	1,52	0,821	354,0	984,7	0,636
300,0	4385,0	1,54	0,812	354,2	987,4	0,635
350,0	4491,9	1,57	0,789	355,0	994,2	0,632

3.3. Кислород

В табл. 3.7 представлены работы, в которых проведено экспериментальное исследование pVT -данных кислорода в газообразном состоянии.

Из таблицы видно, что сжимаемость кислорода изучена довольно слабо. Наиболее обширную область охватывают экспериментальные данные [113], однако они имеют низкую точность. Наиболее точными являются данные работ [115 и 116]. Циклис и Куликова исследовали сжимаемость кислорода в области высоких давлений от 100 до 1000 МПа.

Кроме указанных в табл. 3.7 работ проведены исследования по определению сжимаемости кислорода при отрицательных температурах и в области критической точки, которые при составлении уравнения состояния на основе потенциала Леннарда-Джонса (12-6) не могут быть использованы и поэтому здесь не рассматриваются.

Уравнение состояния кислорода получено в виде (1.3). Предварительная обработка экспериментальных данных показала, что применение потенциала Леннарда-Джонса (12-6) позволяет получить достаточно точное описание их в области $T=323 \div 473$ К и плотностей $\rho=0 \div 300$ кг/м³.

На рис. 3.5 представлены области экспериментального исследования удельного объема кислорода различными авторами; заштрихована область экспериментальных данных, принятая к обработке.

Для получения уравнения состояния кислорода использована аппроксимация табулированных значений второго, четвертого и пятого приведенных вириальных коэффициентов, данная в § 2.1.

В третий вириальный коэффициент введена поправка на неаддитивность по материалам работ [11 и 15]. Неаддитивный вириальный коэффициент кислорода также аппроксимирован полиномом вида (2.2).

В результате минимизации функционала (1.4) получено уравнение состояния кислорода с параметрами потенциала Леннарда-Джонса (12-6), имеющими значения: $b_0=1,6113 \cdot 10^{-3}$ м³/кг и $\epsilon/k=117,45$ К.

Таблица 3.7. Работы по экспериментальному исследованию сжимаемости кислорода в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Авторы	Литература
273—473	0—300	Амага (1893)	[113]
273—293	2—6	Куперс, Камерлинг, Оннес (1921)	[114]
273—373	2,5—10	Гольборн, Отто (1922)	[115]
273—323	2,5—13,5	Михельс, Шамп, де Грааф (1954)	[116]
293—673	100—1000	Циклис, Куликова (1965)	[117]
150—300	3—19	Вебер (1970)	[118]

Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных полученным уравнением состояния равна 0,17%. Сравнительно большая погрешность объясняется невысокой точностью данных Амага. Так, среднее квадратическое отклонение уравнения от данных [116] составляет 0,1, от данных [115] — около 0,07 и от данных [113] — 0,45%. Полученный результат находится в соответствии с точностью экспериментальных данных. Таким образом, соблюдается одно из необходимых условий возможности экстраполяции уравнения состояния: оно описывает экспериментальные данные с погрешностью, не превышающей погрешность самих данных.

Для расчета таблиц теплофизических свойств кислорода использованы константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6), полученные методом переаппроксимации.

Уравнение состояния найдено в виде вириального уравнения (1.3) на основе приведенного выше теоретически обоснованного уравнения и эмпирического уравнения состояния, полученного в [119].

Для получения уравнений вязкости и теплопроводности кислорода при атмосферном и повышенном давлении в совместную обработку включены данные [120].

Уравнения вязкости и теплопроводности при атмосферном давлении найдены в виде (1.24) и (1.27). Уравнения вязкости и теплопроводности при повышенном давлении имеют вид вириальных уравнений (1.25) и (1.28).

Единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) найдены минимизацией интеграла (1.20).

Средние квадратические погрешности аппроксимации экспериментальных данных единым уравнением, %: $\delta z = 0,244$; $\delta \eta_0 = 0,391$; $\delta \eta = 3,747$; $\delta \lambda_0 = 3,358$; $\delta \lambda = 1,597$.

С помощью единых констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) по соотношениям, приведенным в § 1.6, рассчитаны таблицы теплофизических свойств кислорода при $T = 500 \div 2500$ К; максимальные давления на изотермах определялись значением плотности $\rho = 330$ кг/м³, при котором потенциал Леннарда-Джонса (12-6) с пятью вириальными коэффициентами с достаточно высокой точностью описывает сжимаемость.

Для расчета калорических функций произведена аппроксимация их значений в идеально-газовом состоянии по данным работ [42 и 112]. Обработка произведена в интервале 100—2500 К. Идеально-газовые функции представлены в виде полиномов (3.2). За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. Теплота сублимации при 0 К по данным [37] $\Delta h_0^0 = 275$ 542 Дж/кг. Значения коэффициентов аппроксимирующих функций следующие:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 4,73861612 \cdot 10^0 \\ \alpha_1 &= -7,61506410 \cdot 10^{-1} \\ \alpha_2 &= 1,25722229 \cdot 10^0 \\ \alpha_3 &= -5,12575924 \cdot 10^{-1} \\ \alpha_4 &= 1,27772810 \cdot 10^{-1} \\ \alpha_5 &= -1,87809509 \cdot 10^{-2} \\ \alpha_6 &= 1,47132308 \cdot 10^{-3} \\ \alpha_7 &= -4,67131887 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\beta_0 &= 4,73861612 \cdot 10^0 \\ \beta_1 &= 0 \\ \beta_2 &= -1,25722229 \cdot 10^0 \\ \beta_3 &= 1,02515185 \cdot 10^0 \\ \beta_4 &= -3,83318430 \cdot 10^{-1} \\ \beta_5 &= 7,51238036 \cdot 10^{-2} \\ \beta_6 &= -7,35661500 \cdot 10^{-3} \\ \beta_7 &= 2,80279132 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= 3,89013464 \cdot 10^1 \\ \gamma_1 &= -1,87683615 \cdot 10^1 \\ \gamma_2 &= 1,41259483 \cdot 10^1 \\ \gamma_3 &= -6,52759831 \cdot 10^0 \\ \gamma_4 &= 1,77330500 \cdot 10^0 \\ \gamma_5 &= -2,74244473 \cdot 10^{-1} \\ \gamma_6 &= 2,21048682 \cdot 10^{-2} \\ \gamma_7 &= -7,12883025 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

Рис. 3.5. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости кислорода в газообразном состоянии: 1— [113]; 2— [115]; 3— [116]; 4— [117]

Аппроксимирующий полином для теплоемкости получен дифференцированием энтальпии по температуре.

При обработке данных и расчете таблиц теплофизических свойств кислорода использовались физические константы:

масса моля $\mu = 32,00$ г/моль;
газовая постоянная $R = 259,828$ Дж/(кг · К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^s = 275$ 542 Дж/кг;
единицы параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6); $\epsilon/k = 119,1189$ К;
 $b_0 = 1,56704 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Для второго, четвертого и пятого вириальных коэффициентов использованы константы аппроксимации из § 2.1. Константы полинома, аппроксимирующего неаддитивный третий вириальный коэффициент:

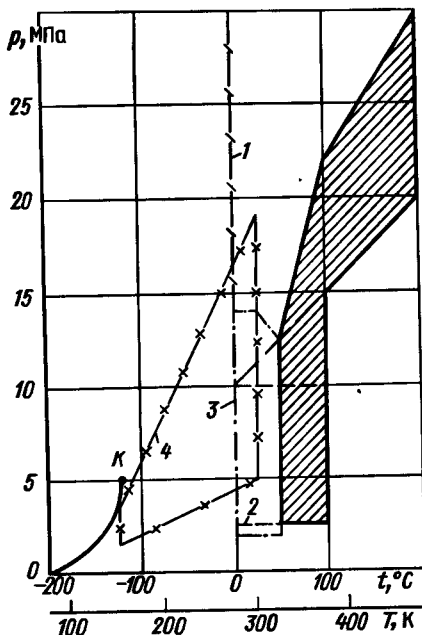
$$c_0 = 1,50537914 \cdot 10^{-1}$$

$$c_1 = 2,36190434 \cdot 10^0$$

$$c_2 = -1,73577032 \cdot 10^1$$

$$c_3 = 8,25081891 \cdot 10^1$$

$$c_4 = -2,51474608 \cdot 10^2$$



$$c_5 = 5,20654559 \cdot 10^2$$

$$c_6 = -6,93428505 \cdot 10^2$$

$$c_7 = 5,29395776 \cdot 10^2$$

$$c_8 = -1,75425500 \cdot 10^2$$

Константы аппроксимации $f_n^{(3)}/\Omega^{(2,2)*}$ те же, что и в § 2.1. Зависимость $\beta_0(T^*)$, входящая в уравнение для λ_0 , представлена полиномом по обратным степеням приведенной температуры $\beta_0(T^*) = \sum_{i=1}^6 m_i (\epsilon/(kT))^i$.

Константы аппроксимации комплексов $B_n^*/\Omega^{(2,2)*}$, $C_n^*/\Omega^{(2,2)*}$, $C_n^*/\Omega^{(2,2)*}$ полиномами по обратным степеням температур для кислорода использованы те же, что и в § 2.1. Рассчитанные значения второго теплопроводностного вириального коэффициента аппроксимированы в виде комплекса $B_k^*/\Omega^{(2,2)*} = \sum_{j=1}^6 p_j (\epsilon/(kT))^j$. Константы аппроксимации β_0 и $B_k^*/\Omega^{(2,2)*}$ и соответствующих степеней аргумента приводятся ниже:

$$m_1 = -9,88465 \cdot 10^0$$

$$m_2 = 1,07212 \cdot 10^1$$

$$m_3 = -4,30595 \cdot 10^0$$

$$m_4 = 1,94011 \cdot 10^0$$

$$m_5 = -2,29350 \cdot 10^{-4}$$

$$m_6 = 5,28632 \cdot 10^{-6}$$

$$s_1 = 3$$

$$s_2 = 2$$

$$s_3 = 1$$

$$s_4 = 0$$

$$s_5 = -2$$

$$s_6 = -3$$

$$p_1 = 1,37050 \cdot 10^{-1}$$

$$p_2 = 4,25699 \cdot 10^{-1}$$

$$p_3 = 5,67485 \cdot 10^{-1}$$

$$p_4 = -2,43555 \cdot 10^{-2}$$

$$p_5 = 7,97945 \cdot 10^{-4}$$

$$p_6 = -1,07255 \cdot 10^{-5}$$

$$s_1 = 1,0$$

$$s_2 = 0,5$$

$$s_3 = 0,0$$

$$s_4 = -0,5$$

$$s_5 = -1,0$$

$$s_6 = -1,5$$

Результаты расчета теплофизических свойств кислорода приводятся в табл. 3.8 и 3.9.

Таблица 3.8. Кислород

p	ρ	z	h	s	c_p	c_p
$T=500\text{ К}$						
0,1	0,77	1,0002	730,3	6,907	0,714	0,974
1,0	7,68	1,0018	729,6	6,307	0,714	0,978
2,0	15,34	1,0037	728,9	6,125	0,715	0,982
3,0	22,96	1,0057	728,2	6,017	0,715	0,987
4,0	30,55	1,0078	727,5	5,941	0,716	0,991
5,0	38,11	1,0099	726,8	5,881	0,717	0,995
6,0	45,63	1,0122	726,2	5,832	0,717	1,000
8,0	60,55	1,0169	724,9	5,753	0,718	1,008
10,0	75,31	1,0221	723,8	5,692	0,719	1,016
12,0	89,89	1,0275	722,7	5,641	0,720	1,024
16,0	118,49	1,0394	720,7	5,560	0,723	1,038
20,0	146,26	1,0525	719,0	5,496	0,725	1,052
25,0	179,75	1,0706	717,2	5,431	0,727	1,067
30,0	211,80	1,0903	715,9	5,377	0,730	1,080
35,0	242,39	1,1115	714,9	5,331	0,732	1,092
40,0	271,53	1,1339	714,3	5,291	0,734	1,102
45,0	299,25	1,1575	714,1	5,255	0,736	1,110
50,0	325,60	1,1820	714,1	5,223	0,738	1,118
$T=600\text{ К}$						
0,1	0,64	1,0002	833,7	7,082	0,741	1,001
1,0	6,40	1,0025	833,4	6,483	0,742	1,004
2,0	12,76	1,0051	833,0	6,301	0,742	1,007
3,0	19,10	1,0077	832,7	6,195	0,743	1,010
4,0	25,39	1,0103	832,3	6,119	0,743	1,013
5,0	31,66	1,0130	832,0	6,060	0,743	1,016
6,0	37,89	1,0158	831,7	6,011	0,744	1,018
8,0	50,24	1,0215	831,1	5,934	0,745	1,024
10,0	62,44	1,0273	830,6	5,874	0,745	1,029
12,0	74,49	1,0333	830,1	5,824	0,746	1,034
16,0	98,12	1,0459	829,3	5,745	0,748	1,044
20,0	121,12	1,0592	828,7	5,683	0,749	1,053
25,0	148,94	1,0767	828,2	5,620	0,751	1,063
30,0	175,73	1,0950	828,0	5,568	0,753	1,072
35,0	201,50	1,1142	828,0	5,524	0,755	1,081
40,0	226,25	1,1340	828,3	5,486	0,757	1,088
45,0	250,01	1,1545	828,8	5,452	0,758	1,095
50,0	272,81	1,1756	829,5	5,421	0,760	1,101
60,0	315,69	1,2191	831,5	5,368	0,764	1,111
$T=700\text{ К}$						
0,1	0,55	1,0003	936,6	7,232	0,767	1,027
1,0	5,48	1,0027	936,5	6,633	0,768	1,029
2,0	10,94	1,0055	936,3	6,452	0,768	1,031
3,0	16,36	1,0083	936,2	6,346	0,768	1,033
4,0	21,75	1,0111	936,2	6,270	0,769	1,035
5,0	27,11	1,0139	936,1	6,211	0,769	1,037
6,0	32,44	1,0168	936,0	6,163	0,769	1,039
8,0	43,01	1,0227	935,9	6,087	0,770	1,043
10,0	53,45	1,0286	935,8	6,027	0,771	1,047
12,0	63,77	1,0347	935,7	5,978	0,771	1,051
16,0	84,01	1,0471	935,7	5,900	0,773	1,057

Кислород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
20,0	103,75	1,0599	935,9	5,840	0,774	1,064
25,0	127,69	1,0764	936,3	5,778	0,775	1,071
30,0	150,85	1,0934	936,8	5,728	0,777	1,078
35,0	173,21	1,1109	937,6	5,685	0,779	1,085
40,0	194,82	1,1289	938,5	5,647	0,780	1,090
45,0	215,67	1,1472	939,6	5,614	0,781	1,096
50,0	235,80	1,1658	940,9	5,584	0,783	1,100
60,0	274,00	1,2039	943,8	5,532	0,786	1,109
70,0	309,62	1,2430	947,2	5,488	0,789	1,116

T=800 K

0,1	0,48	1,0003	1041,0	7,366	0,791	1,051
1,0	4,80	1,0027	1041,1	6,767	0,791	1,052
2,0	9,57	1,0055	1041,1	6,587	0,791	1,054
3,0	14,31	1,0083	1041,2	6,481	0,792	1,055
4,0	19,03	1,0111	1041,3	6,405	0,792	1,057
5,0	23,72	1,0139	1041,4	6,347	0,792	1,058
6,0	28,39	1,0168	1041,5	6,299	0,792	1,060
8,0	37,64	1,0225	1041,7	6,223	0,793	1,063
10,0	46,78	1,0283	1041,9	6,164	0,794	1,065
12,0	55,82	1,0341	1042,2	6,115	0,794	1,068
16,0	73,58	1,0460	1042,8	6,038	0,795	1,073
20,0	90,92	1,0582	1043,5	5,978	0,796	1,078
25,0	112,02	1,0737	1044,5	5,918	0,798	1,084
30,0	132,47	1,0895	1045,7	5,868	0,799	1,089
35,0	152,30	1,1056	1047,0	5,826	0,800	1,094
40,0	171,52	1,1219	1048,5	5,789	0,802	1,099
45,0	190,15	1,1385	1050,0	5,756	0,803	1,103
50,0	208,20	1,1553	1051,7	5,727	0,804	1,107
60,0	242,68	1,1894	1055,4	5,676	0,807	1,114
70,0	275,10	1,2241	1059,5	5,633	0,809	1,120
80,0	305,62	1,2593	1063,8	5,595	0,812	1,125

T=900 K

0,1	0,43	1,0003	1147,3	7,490	0,811	1,071
1,0	4,26	1,0027	1147,5	6,891	0,812	1,072
2,0	8,51	1,0054	1147,7	6,710	0,812	1,074
3,0	12,73	1,0081	1147,9	6,604	0,812	1,075
4,0	16,92	1,0108	1148,1	6,529	0,812	1,076
5,0	21,10	1,0135	1148,4	6,471	0,813	1,077
6,0	25,25	1,0162	1148,6	6,423	0,813	1,078
8,0	33,48	1,0217	1149,0	6,347	0,813	1,080
10,0	41,63	1,0273	1149,5	6,288	0,814	1,083
12,0	49,68	1,0329	1150,0	6,240	0,814	1,085
16,0	65,53	1,0442	1151,1	6,164	0,815	1,089
20,0	81,02	1,0556	1152,3	6,104	0,816	1,093
25,0	99,91	1,0701	1153,8	6,044	0,817	1,097
30,0	118,26	1,0847	1155,4	5,995	0,819	1,101
35,0	136,11	1,0996	1157,2	5,953	0,820	1,105
40,0	153,46	1,1146	1159,1	5,917	0,821	1,109
45,0	170,32	1,1298	1161,0	5,885	0,822	1,112
50,0	186,72	1,1451	1163,0	5,856	0,823	1,116
60,0	218,17	1,1760	1167,4	5,806	0,826	1,121
70,0	247,93	1,2074	1172,0	5,763	0,828	1,127

Кислород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
80,0	276,12	1,2390	1176,8	5,726	0,830	1,131
90,0	302,86	1,2708	1181,9	5,693	0,832	1,135
100,0	328,25	1,3027	1187,2	5,664	0,834	1,139

T = 1000 K

0,1	0,38	1,0003	1255,5	7,604	0,829	1,089
1,0	3,84	1,0026	1255,8	7,005	0,829	1,090
5,0	19,00	1,0129	1257,0	6,586	0,830	1,094
10,0	37,51	1,0260	1258,7	6,404	0,831	1,098
20,0	73,12	1,0527	1262,3	6,221	0,834	1,106
30,0	106,92	1,0799	1266,3	6,112	0,836	1,113
40,0	138,99	1,1076	1270,6	6,035	0,838	1,119
50,0	169,45	1,1356	1275,2	5,975	0,840	1,125
60,0	198,39	1,1639	1280,0	5,925	0,842	1,130
70,0	225,91	1,1925	1285,1	5,883	0,844	1,134
80,0	252,11	1,2213	1290,4	5,846	0,846	1,138
90,0	277,07	1,2501	1295,8	5,814	0,848	1,141
100,0	300,89	1,2791	1301,5	5,785	0,849	1,145

T = 1100 K

0,1	0,35	1,0002	1365,2	7,711	0,845	1,105
1,0	3,49	1,0024	1365,6	7,112	0,845	1,105
5,0	17,28	1,0123	1367,2	6,693	0,846	1,108
10,0	34,14	1,0247	1369,2	6,511	0,847	1,112
20,0	66,66	1,0498	1373,6	6,329	0,848	1,118
30,0	97,62	1,0752	1378,2	6,221	0,850	1,124
40,0	127,12	1,1010	1383,1	6,144	0,852	1,129
50,0	155,23	1,1269	1388,2	6,084	0,854	1,134
60,0	182,06	1,1531	1393,5	6,035	0,856	1,138
70,0	207,67	1,1793	1398,9	5,994	0,857	1,142
80,0	232,14	1,2057	1404,6	5,957	0,859	1,145
90,0	255,55	1,2322	1410,4	5,925	0,861	1,148
100,0	277,96	1,2587	1416,3	5,897	0,863	1,151
120,0	320,07	1,3117	1428,4	5,847	0,866	1,156

T = 1200 K

0,1	0,32	1,0002	1476,4	7,810	0,858	1,118
1,0	3,20	1,0023	1476,8	7,212	0,858	1,118
5,0	15,85	1,0117	1478,7	6,793	0,859	1,121
10,0	31,34	1,0234	1481,0	6,612	0,860	1,124
20,0	61,26	1,0470	1486,0	6,429	0,861	1,129
30,0	89,85	1,0709	1491,1	6,322	0,863	1,134
40,0	117,17	1,0949	1496,4	6,246	0,865	1,138
50,0	143,30	1,1190	1502,0	6,186	0,866	1,142
60,0	168,31	1,1433	1507,7	6,137	0,868	1,145
70,0	192,27	1,1677	1513,5	6,096	0,869	1,149
80,0	215,24	1,1921	1519,4	6,060	0,871	1,152
90,0	237,28	1,2165	1525,5	6,028	0,872	1,154
100,0	258,45	1,2409	1531,7	6,000	0,874	1,157
120,0	298,39	1,2898	1544,3	5,950	0,877	1,161

T = 1300 K

0,1	0,30	1,0002	1588,8	7,903	0,869	1,129
-----	------	--------	--------	-------	-------	-------

Кислород

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
1,0	2,95	1,0022	1589,2	7,305	0,870	1,130
5,0	14,64	1,0110	1591,3	6,886	0,870	1,132
10,0	28,96	1,0221	1593,9	6,705	0,871	1,134
20,0	56,69	1,0444	1599,4	6,523	0,872	1,138
30,0	83,25	1,0668	1604,9	6,416	0,874	1,142
40,0	108,71	1,0893	1610,7	6,340	0,875	1,146
50,0	133,12	1,1119	1616,6	6,281	0,877	1,149
60,0	156,56	1,1346	1622,6	6,232	0,878	1,152
70,0	179,07	1,1572	1628,7	6,191	0,879	1,155
80,0	200,72	1,1799	1634,9	6,155	0,881	1,158
90,0	221,55	1,2026	1641,2	6,124	0,882	1,160
100,0	241,61	1,2253	1647,6	6,096	0,883	1,162
120,0	279,59	1,2706	1660,6	6,046	0,886	1,166
140,0	314,99	1,3158	1673,9	6,005	0,889	1,169

$T=1400$ K

0,1	0,27	1,0002	1702,2	7,990	0,879	1,139
1,0	2,74	1,0021	1702,7	7,392	0,879	1,140
5,0	13,60	1,0105	1705,0	6,973	0,880	1,141
10,0	26,93	1,0210	1707,8	6,792	0,881	1,143
20,0	52,76	1,0420	1713,6	6,611	0,882	1,147
30,0	77,57	1,0631	1719,6	6,504	0,883	1,150
40,0	101,41	1,0843	1725,7	6,428	0,885	1,153
50,0	124,34	1,1055	1731,9	6,369	0,886	1,156
60,0	146,39	1,1267	1738,1	6,321	0,887	1,159
70,0	167,63	1,1479	1744,5	6,280	0,888	1,161
80,0	188,10	1,1691	1751,0	6,244	0,889	1,163
90,0	207,85	1,1903	1757,5	6,213	0,891	1,165
100,0	226,91	1,2115	1764,1	6,185	0,892	1,167
120,0	263,11	1,2538	1777,5	6,136	0,894	1,171
140,0	296,99	1,2959	1791,0	6,094	0,896	1,173
160,0	328,80	1,3377	1804,7	6,059	0,899	1,176

$T=1500$ K

0,1	0,26	1,0002	1816,6	8,071	0,888	1,148
1,0	2,56	1,0020	1817,1	7,473	0,888	1,148
5,0	12,70	1,0099	1819,5	7,054	0,888	1,149
10,0	25,16	1,0199	1822,6	6,873	0,889	1,151
20,0	49,35	1,0398	1828,7	6,692	0,890	1,154
30,0	72,63	1,0597	1835,0	6,586	0,891	1,157
40,0	95,06	1,0797	1841,3	6,510	0,893	1,160
50,0	116,66	1,0996	1847,8	6,451	0,894	1,162
60,0	137,50	1,1196	1854,3	6,403	0,895	1,164
70,0	157,61	1,1395	1860,9	6,362	0,896	1,166
80,0	177,03	1,1595	1867,6	6,327	0,897	1,168
90,0	195,80	1,1794	1874,3	6,296	0,898	1,170
100,0	213,95	1,1992	1881,1	6,268	0,899	1,172
120,0	248,54	1,2388	1894,7	6,219	0,901	1,175
140,0	281,02	1,2782	1908,6	6,178	0,903	1,177
160,0	311,61	1,3174	1922,5	6,142	0,905	1,180

$T=1750$ K

0,1	0,22	1,0002	2105,8	8,252	0,905	1,165
1,0	2,20	1,0018	2106,4	7,653	0,905	1,165

Кислород

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
5,0	10,90	1,0088	2109,1	7,235	0,905	1,166
10,0	21,61	1,0175	2112,4	7,054	0,906	1,167
20,0	42,50	1,0350	2119,2	6,874	0,907	1,169
30,0	62,69	1,0525	2126,1	6,768	0,908	1,171
40,0	82,22	1,0699	2133,0	6,692	0,909	1,173
50,0	101,13	1,0873	2140,0	6,634	0,909	1,175
60,0	119,45	1,1047	2147,0	6,586	0,910	1,176
70,0	137,21	1,1220	2154,0	6,545	0,911	1,178
80,0	154,43	1,1393	2161,1	6,510	0,912	1,179
90,0	171,14	1,1565	2168,2	6,479	0,913	1,180
100,0	187,38	1,1737	2175,3	6,451	0,913	1,182
120,0	218,48	1,2079	2189,6	6,403	0,915	1,184
140,0	247,92	1,2419	2204,0	6,362	0,917	1,186
160,0	275,83	1,2757	2218,4	6,327	0,918	1,187
180,0	302,35	1,3093	2232,9	6,296	0,920	1,189
200,0	327,61	1,3426	2247,4	6,267	0,921	1,190

T = 2000 K

0,1	0,19	1,0002	2398,6	8,405	0,917	1,177
1,0	1,92	1,0016	2399,3	7,807	0,917	1,177
5,0	9,55	1,0078	2402,1	7,389	0,918	1,178
10,0	18,95	1,0156	2405,7	7,208	0,918	1,179
20,0	37,32	1,0311	2413,0	7,028	0,919	1,180
30,0	55,16	1,0466	2420,2	6,922	0,919	1,182
40,0	72,47	1,0621	2427,5	6,847	0,920	1,183
50,0	89,30	1,0775	2434,9	6,788	0,921	1,184
60,0	105,65	1,0928	2442,2	6,741	0,921	1,185
70,0	121,56	1,1081	2449,5	6,700	0,922	1,186
80,0	137,04	1,1234	2456,9	6,665	0,923	1,187
90,0	152,11	1,1386	2464,3	6,634	0,923	1,188
100,0	166,79	1,1537	2471,7	6,607	0,924	1,189
120,0	195,05	1,1838	2486,4	6,559	0,925	1,191
140,0	221,95	1,2138	2501,3	6,518	0,926	1,192
160,0	247,60	1,2435	2516,1	6,483	0,928	1,194
180,0	272,09	1,2730	2530,9	6,452	0,929	1,195
200,0	295,53	1,3023	2545,7	6,424	0,930	1,196
220,0	317,98	1,3314	2560,5	6,399	0,931	1,197

T = 2250 K

0,1	0,17	1,0001	2694,1	8,537	0,927	1,187
1,0	1,71	1,0014	2694,8	7,939	0,927	1,187
5,0	8,49	1,0070	2697,8	7,520	0,927	1,187
10,0	16,87	1,0140	2701,6	7,340	0,927	1,188
20,0	33,28	1,0280	2709,2	7,160	0,928	1,189
30,0	49,25	1,0419	2716,7	7,054	0,928	1,190
40,0	64,81	1,0557	2724,3	6,979	0,929	1,191
50,0	79,97	1,0695	2731,8	6,921	0,929	1,191
60,0	94,74	1,0833	2739,4	6,873	0,930	1,192
70,0	109,15	1,0969	2747,0	6,833	0,930	1,193
80,0	123,21	1,1106	2754,6	6,798	0,931	1,194
90,0	136,94	1,1242	2762,1	6,767	0,931	1,195
100,0	150,34	1,1377	2769,7	6,739	0,932	1,195
120,0	176,24	1,1646	2784,9	6,692	0,933	1,196
140,0	201,00	1,1914	2800,0	6,651	0,934	1,198

Кислород

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
160,0	224,72	1,2179	2815,1	6,616	0,935	1,199
180,0	247,45	1,2442	2830,2	6,585	0,936	1,200
200,0	269,29	1,2704	2845,3	6,558	0,936	1,200
220,0	290,29	1,2963	2860,3	6,532	0,937	1,201
240,0	310,51	1,3221	2875,3	6,509	0,938	1,202
260,0	329,99	1,3477	2890,3	6,488	0,939	1,203

$T=2500$ К

0,1	0,15	1,0001	2991,7	8,650	0,934	1,194
1,0	1,54	1,0013	2992,4	8,052	0,934	1,194
5,0	7,65	1,0064	2995,5	7,634	0,934	1,194
10,0	15,20	1,0127	2999,4	7,454	0,934	1,194
20,0	30,03	1,0253	3007,2	7,273	0,935	1,195
30,0	44,50	1,0379	3014,9	7,168	0,935	1,196
40,0	58,62	1,0505	3022,7	7,093	0,936	1,197
50,0	72,41	1,0630	3030,5	7,035	0,936	1,197
60,0	85,89	1,0754	3038,2	6,987	0,936	1,198
70,0	99,07	1,0878	3046,0	6,947	0,937	1,199
80,0	111,95	1,1001	3053,7	6,912	0,937	1,199
90,0	124,55	1,1124	3061,4	6,881	0,938	1,200
100,0	136,88	1,1246	3069,2	6,854	0,938	1,200
120,0	160,78	1,1490	3084,6	6,806	0,939	1,201
140,0	183,72	1,1731	3100,0	6,766	0,939	1,202
160,0	205,76	1,1971	3115,3	6,731	0,940	1,203
180,0	226,97	1,2208	3130,6	6,700	0,941	1,204
200,0	247,41	1,2445	3145,9	6,672	0,942	1,204
220,0	267,12	1,2679	3161,1	6,647	0,942	1,205
240,0	286,15	1,2912	3176,3	6,625	0,943	1,205
260,0	304,54	1,3143	3191,4	6,604	0,944	1,206
280,0	322,34	1,3372	3206,5	6,584	0,944	1,207

Таблица 3.9. Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

$T=500$ К

0,1	421,1	1,36	1,001	303,5	41,0	0,721
1,0	422,5	1,37	1,006	304,3	41,2	0,723
2,0	424,1	1,38	1,011	305,3	41,4	0,725
3,0	425,8	1,39	1,016	306,3	41,6	0,727
4,0	427,5	1,40	1,021	307,4	41,8	0,728
5,0	429,3	1,40	1,025	308,4	42,1	0,730
6,0	431,1	1,41	1,029	309,6	42,3	0,732
8,0	434,8	1,43	1,037	311,9	42,8	0,735
10,0	438,7	1,45	1,043	314,4	43,2	0,738
12,0	442,8	1,47	1,048	316,9	43,7	0,742
16,0	451,5	1,51	1,055	322,4	44,8	0,748
20,0	460,8	1,55	1,057	328,3	45,8	0,753
25,0	473,1	1,61	1,055	336,0	47,2	0,760
30,0	486,2	1,67	1,048	344,2	48,6	0,765

Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
35,0	499,3	1,73	1,037	352,7	50,0	0,770
40,0	513,8	1,79	1,022	361,3	51,4	0,775
45,0	528,2	1,86	1,006	370,1	52,8	0,779
50,0	542,8	1,92	0,987	378,9	54,2	0,782

$T=600$ K

0,1	459,0	1,35	1,000	345,1	47,9	0,721
1,0	460,6	1,36	1,002	345,8	48,1	0,722
2,0	462,3	1,36	1,005	346,5	48,3	0,723
3,0	464,0	1,37	1,006	347,3	48,5	0,724
4,0	465,8	1,38	1,008	348,1	48,7	0,725
5,0	467,7	1,38	1,010	348,9	48,8	0,725
6,0	469,5	1,39	1,011	349,8	49,0	0,726
8,0	473,3	1,41	1,014	351,6	49,4	0,728
10,0	477,1	1,42	1,016	353,4	49,8	0,730
12,0	481,1	1,44	1,017	355,4	50,2	0,731
16,0	489,3	1,47	1,017	359,5	51,1	0,735
20,0	497,9	1,50	1,016	363,9	51,9	0,738
25,0	509,0	1,54	1,011	369,7	53,0	0,741
30,0	520,5	1,59	1,003	375,8	54,2	0,744
35,0	532,4	1,63	0,993	382,2	55,3	0,747
40,0	544,5	1,68	0,982	388,8	56,4	0,750
45,0	556,8	1,72	0,969	395,5	57,6	0,752
50,0	569,3	1,77	0,955	402,3	58,7	0,754
60,0	594,6	1,86	0,926	416,2	61,0	0,758

$T=700$ K

0,1	493,6	1,34	1,000	383,8	54,7	0,721
1,0	495,2	1,34	1,001	384,3	54,8	0,721
2,0	496,9	1,35	1,001	384,9	55,0	0,722
3,0	498,7	1,36	1,002	385,5	55,2	0,722
4,0	500,5	1,36	1,002	386,1	55,3	0,723
5,0	502,3	1,37	1,002	386,8	55,5	0,723
6,0	504,2	1,37	1,002	387,5	55,6	0,724
8,0	507,9	1,39	1,002	388,9	56,0	0,725
10,0	511,7	1,40	1,002	390,3	56,3	0,725
12,0	515,5	1,41	1,001	391,9	56,7	0,726
16,0	523,3	1,44	0,998	395,1	57,4	0,728
20,0	531,4	1,46	0,994	398,5	58,1	0,730
25,0	541,7	1,50	0,988	403,1	59,0	0,731
30,0	552,2	1,53	0,980	407,9	60,0	0,733
35,0	562,9	1,57	0,971	412,9	60,9	0,735
40,0	573,9	1,60	0,960	418,1	61,9	0,736
45,0	584,9	1,64	0,949	423,5	62,9	0,738
50,0	596,1	1,68	0,937	428,9	63,9	0,739
60,0	618,6	1,75	0,913	440,1	65,8	0,742
70,0	641,2	1,82	0,888	451,6	67,7	0,744

$T=800$ K

0,1	525,7	1,33	1,000	420,1	61,2	0,721
1,0	527,3	1,33	1,000	420,6	61,3	0,721
2,0	529,0	1,34	0,999	421,0	61,5	0,721
3,0	530,8	1,34	0,999	421,5	61,6	0,722

Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
4,0	532,6	1,35	0,998	422,1	61,8	0,722
5,0	534,3	1,35	0,998	422,6	61,9	0,722
6,0	536,1	1,36	0,997	423,1	62,1	0,722
8,0	539,8	1,37	0,996	424,3	62,4	0,723
10,0	543,4	1,38	0,994	425,4	62,7	0,723
12,0	547,1	1,39	0,992	426,7	63,0	0,724
16,0	554,6	1,41	0,988	429,2	63,6	0,724
20,0	562,2	1,44	0,983	432,0	64,2	0,725
25,0	571,9	1,47	0,975	435,7	65,0	0,726
30,0	581,8	1,49	0,967	439,6	65,9	0,727
35,0	591,7	1,52	0,958	443,6	66,7	0,728
40,0	601,8	1,55	0,948	447,8	67,5	0,729
45,0	611,9	1,58	0,938	452,2	68,4	0,729
50,0	622,1	1,61	0,928	456,7	69,2	0,730
60,0	642,7	1,67	0,906	465,9	70,9	0,732
70,0	663,3	1,73	0,884	475,5	72,6	0,733
80,0	683,9	1,79	0,862	485,2	74,3	0,735

$T=900\text{ K}$

0,1	555,8	1,32	1,000	454,7	67,5	0,721
1,0	557,4	1,32	0,999	455,0	67,6	0,721
2,0	559,1	1,33	0,998	455,4	67,8	0,721
3,0	560,8	1,33	0,997	455,8	67,9	0,721
4,0	562,6	1,34	0,996	456,2	68,0	0,721
5,0	564,3	1,34	0,995	456,6	68,2	0,721
6,0	566,0	1,35	0,994	457,1	68,3	0,722
8,0	569,6	1,36	0,992	458,0	68,6	0,722
10,0	573,1	1,37	0,990	459,0	68,8	0,722
12,0	576,7	1,38	0,987	460,0	69,1	0,722
16,0	583,9	1,40	0,982	462,1	69,7	0,722
20,0	591,1	1,42	0,976	464,3	70,2	0,722
25,0	600,3	1,44	0,968	467,3	70,9	0,723
30,0	609,6	1,46	0,960	470,5	71,7	0,723
35,0	619,0	1,49	0,951	473,9	72,4	0,723
40,0	628,4	1,51	0,942	477,4	73,2	0,724
45,0	637,9	1,54	0,932	481,0	73,9	0,724
50,0	647,4	1,57	0,922	484,7	74,7	0,724
60,0	666,5	1,62	0,902	492,5	76,2	0,725
70,0	685,6	1,66	0,882	500,5	77,7	0,726
80,0	704,7	1,71	0,862	508,8	79,2	0,727
90,0	723,7	1,76	0,843	517,2	80,7	0,728
100,0	742,5	1,81	0,824	525,7	82,1	0,729

$T=1000\text{ K}$

0,1	584,3	1,31	1,000	487,7	73,6	0,721
1,0	585,8	1,32	0,999	487,9	73,7	0,721
5,0	592,6	1,33	0,994	489,3	74,2	0,721
10,0	601,1	1,36	0,987	491,2	74,8	0,721
20,0	618,5	1,40	0,972	495,6	76,1	0,720
30,0	636,1	1,44	0,956	500,7	77,4	0,720
40,0	653,9	1,49	0,938	506,4	78,7	0,720
50,0	671,8	1,53	0,920	512,6	80,1	0,720
60,0	689,7	1,57	0,901	519,2	81,4	0,720

Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
70,0	707,6	1,62	0,883	526,1	82,8	0,721
80,0	725,5	1,66	0,865	533,2	84,1	0,721
90,0	743,3	1,70	0,846	540,5	85,5	0,722
100,0	761,0	1,74	0,829	547,9	86,9	0,722
$T=1100\text{ K}$						
0,1	611,5	1,31	1,000	519,4	79,5	0,721
1,0	613,0	1,31	0,999	519,6	79,6	0,721
5,0	619,6	1,33	0,993	520,7	80,1	0,721
10,0	627,8	1,35	0,986	522,2	80,6	0,720
20,0	644,5	1,38	0,970	525,9	81,8	0,719
30,0	661,4	1,42	0,954	530,2	83,0	0,718
40,0	678,4	1,46	0,937	535,0	84,2	0,718
50,0	695,4	1,50	0,919	540,2	85,4	0,717
60,0	712,4	1,54	0,902	545,9	86,6	0,717
70,0	729,3	1,58	0,884	551,8	87,9	0,717
80,0	746,3	1,62	0,867	557,9	89,1	0,717
90,0	763,1	1,65	0,850	564,3	90,4	0,717
100,0	779,8	1,69	0,834	570,8	91,6	0,717
120,0	812,8	1,76	0,803	584,1	94,1	0,718
$T=1200\text{ K}$						
0,1	637,5	1,30	1,000	550,0	85,3	0,721
1,0	639,0	1,31	0,999	550,1	85,3	0,721
5,0	645,4	1,32	0,993	551,0	85,7	0,720
10,0	653,4	1,34	0,985	552,3	86,3	0,719
20,0	669,5	1,37	0,969	555,3	87,3	0,718
30,0	685,7	1,41	0,953	558,9	88,4	0,717
40,0	702,0	1,44	0,936	563,0	89,5	0,716
50,0	718,2	1,48	0,920	567,5	90,6	0,715
60,0	734,4	1,51	0,903	572,3	91,8	0,714
70,0	750,6	1,55	0,887	577,4	92,9	0,714
80,0	766,7	1,58	0,871	582,8	94,1	0,714
90,0	782,7	1,62	0,855	588,4	95,2	0,713
100,0	798,6	1,65	0,839	594,1	96,3	0,713
120,0	830,1	1,71	0,810	605,9	98,6	0,713
$T=1300\text{ K}$						
0,1	662,5	1,30	1,000	579,6	90,8	0,721
1,0	663,9	1,30	0,998	579,7	90,9	0,721
5,0	670,1	1,31	0,992	580,4	91,2	0,720
10,0	677,9	1,33	0,985	581,5	91,7	0,719
20,0	693,5	1,36	0,969	584,0	92,7	0,717
30,0	709,2	1,40	0,953	587,0	93,7	0,716
40,0	724,8	1,43	0,937	590,5	94,7	0,714
50,0	740,4	1,46	0,921	594,3	95,8	0,713
60,0	755,9	1,49	0,905	598,5	96,8	0,712
70,0	771,4	1,52	0,889	602,9	97,9	0,712
80,0	786,9	1,55	0,874	607,6	98,9	0,711
90,0	802,2	1,58	0,859	612,5	100,0	0,711
100,0	817,4	1,61	0,845	617,6	101,1	0,710
120,0	847,5	1,67	0,816	628,1	103,2	0,710
140,0	877,1	1,73	0,790	639,0	105,3	0,710

Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=1400\text{ K}$						
0,1	686,6	1,30	1,000	608,3	96,2	0,721
1,0	688,0	1,30	0,998	608,4	96,2	0,720
5,0	694,0	1,31	0,992	609,0	96,6	0,720
10,0	701,6	1,33	0,985	609,9	97,0	0,719
20,0	716,7	1,36	0,969	612,0	97,9	0,717
30,0	731,8	1,38	0,953	614,5	98,9	0,715
40,0	746,9	1,41	0,938	617,5	99,8	0,713
50,0	761,9	1,44	0,922	620,8	100,8	0,712
60,0	776,9	1,47	0,907	624,4	101,8	0,711
70,0	791,8	1,50	0,892	628,2	102,8	0,710
80,0	806,6	1,53	0,878	632,4	103,7	0,709
90,0	821,4	1,56	0,864	636,7	104,7	0,708
100,0	836,0	1,59	0,850	641,1	105,7	0,708
120,0	864,9	1,64	0,823	650,5	107,7	0,707
140,0	893,3	1,69	0,798	660,3	109,7	0,706
160,0	921,3	1,74	0,774	670,5	111,6	0,706
$T=1500\text{ K}$						
0,1	709,9	1,29	1,000	636,3	101,4	0,720
1,0	711,3	1,30	0,998	636,4	101,5	0,720
5,0	717,1	1,31	0,992	636,9	101,8	0,719
10,0	724,5	1,32	0,985	637,5	102,2	0,718
20,0	739,2	1,35	0,969	639,3	103,0	0,716
30,0	753,8	1,38	0,954	641,4	103,9	0,714
40,0	768,4	1,40	0,939	643,9	104,8	0,713
50,0	782,9	1,43	0,924	646,8	105,7	0,711
60,0	797,4	1,46	0,910	649,9	106,6	0,710
70,0	811,8	1,48	0,895	653,3	107,5	0,709
80,0	826,1	1,51	0,882	656,9	108,5	0,708
90,0	840,2	1,54	0,868	660,7	109,4	0,707
100,0	854,3	1,56	0,855	664,7	110,3	0,706
120,0	882,2	1,61	0,829	673,1	112,2	0,705
140,0	909,7	1,66	0,805	681,9	114,1	0,704
160,0	936,6	1,71	0,782	691,1	115,9	0,703
$T=1750\text{ K}$						
0,1	765,2	1,29	1,000	703,4	113,8	0,720
1,0	766,4	1,29	0,999	703,4	113,9	0,720
5,0	771,9	1,30	0,993	703,6	114,2	0,719
10,0	778,8	1,31	0,985	704,0	114,5	0,717
20,0	792,5	1,33	0,971	705,0	115,3	0,715
30,0	806,1	1,36	0,957	706,4	116,0	0,713
40,0	819,7	1,38	0,943	708,1	116,8	0,711
50,0	833,1	1,40	0,929	710,1	117,6	0,709
60,0	846,5	1,43	0,916	712,3	118,4	0,708
70,0	859,8	1,45	0,903	714,7	119,1	0,706
80,0	873,0	1,47	0,891	717,3	119,9	0,705
90,0	886,1	1,49	0,878	720,2	120,8	0,704
100,0	899,2	1,51	0,866	723,1	121,6	0,703
120,0	924,9	1,56	0,843	729,5	123,2	0,701
140,0	950,3	1,60	0,821	736,4	124,8	0,700
160,0	975,2	1,64	0,801	743,6	126,4	0,699

Кислород

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
180,0	999,8	1,68	0,781	751,2	128,0	0,698
200,0	1023,9	1,72	0,762	758,9	129,6	0,697
<i>T=2000 K</i>						
0,1	816,7	1,28	1,000	766,9	125,5	0,719
1,0	817,9	1,29	0,999	766,9	125,6	0,719
5,0	823,1	1,29	0,993	767,0	125,9	0,718
10,0	829,6	1,30	0,986	767,1	126,2	0,717
20,0	842,4	1,32	0,973	767,7	126,8	0,714
30,0	855,2	1,34	0,960	768,5	127,5	0,712
40,0	867,9	1,36	0,947	769,6	128,2	0,710
50,0	880,6	1,38	0,935	771,0	128,8	0,709
60,0	893,1	1,40	0,922	772,5	129,5	0,707
70,0	905,5	1,42	0,911	774,3	130,2	0,705
80,0	917,9	1,44	0,899	776,2	130,9	0,704
90,0	930,2	1,46	0,888	778,3	131,6	0,703
100,0	942,3	1,48	0,877	780,6	132,3	0,701
120,0	966,4	1,52	0,856	785,5	133,8	0,699
140,0	990,2	1,55	0,836	790,9	135,2	0,697
160,0	1013,5	1,59	0,816	796,6	136,6	0,696
180,0	1036,5	1,62	0,798	802,7	138,1	0,695
200,0	1059,2	1,66	0,781	809,0	139,5	0,694
220,0	1081,5	1,69	0,765	815,5	140,9	0,693
<i>T=2250 K</i>						
0,1	865,3	1,28	1,000	827,6	136,7	0,719
1,0	866,4	1,28	0,999	827,6	136,7	0,718
5,0	871,3	1,29	0,994	827,5	136,9	0,717
10,0	877,4	1,30	0,987	827,5	137,2	0,716
20,0	889,6	1,32	0,975	827,8	137,8	0,714
30,0	901,7	1,33	0,963	828,2	138,4	0,712
40,0	913,7	1,35	0,951	828,9	139,0	0,710
50,0	925,6	1,37	0,939	829,8	139,6	0,708
60,0	937,5	1,39	0,928	830,9	140,2	0,707
70,0	949,2	1,40	0,917	832,1	140,8	0,705
80,0	960,9	1,42	0,907	833,6	141,5	0,703
90,0	972,4	1,44	0,896	835,1	142,1	0,702
100,0	983,9	1,46	0,886	836,8	142,7	0,701
120,0	1006,7	1,49	0,867	840,6	144,0	0,698
140,0	1029,1	1,52	0,848	844,8	145,3	0,696
160,0	1051,1	1,55	0,830	849,4	146,6	0,695
180,0	1072,9	1,58	0,813	854,3	147,9	0,693
200,0	1094,3	1,61	0,797	859,5	149,2	0,692
220,0	1115,5	1,64	0,782	864,9	150,4	0,691
240,0	1136,3	1,67	0,767	870,5	151,7	0,690
260,0	1156,9	1,70	0,753	876,3	153,0	0,689
<i>T=2500 K</i>						
0,1	911,3	1,28	1,000	885,8	147,3	0,718
1,0	912,4	1,28	0,999	885,8	147,3	0,718
5,0	917,1	1,29	0,994	885,7	147,5	0,717
10,0	922,9	1,29	0,988	885,6	147,8	0,716
20,0	934,4	1,31	0,977	885,6	148,3	0,714

Кислород

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
30,0	945,9	1,33	0,965	885,8	148,8	0,712
40,0	957,3	1,34	0,955	886,1	149,4	0,710
50,0	968,7	1,36	0,944	886,7	149,9	0,708
60,0	979,9	1,37	0,933	887,4	150,5	0,706
70,0	991,0	1,39	0,923	888,3	151,1	0,705
80,0	1002,1	1,41	0,913	889,3	151,6	0,703
90,0	1013,1	1,42	0,904	890,5	152,2	0,702
100,0	1024,0	1,44	0,894	891,8	152,8	0,701
120,0	1045,6	1,46	0,876	894,7	153,9	0,698
140,0	1066,9	1,49	0,859	898,0	155,1	0,696
160,0	1087,9	1,52	0,842	901,7	156,3	0,694
180,0	1108,6	1,55	0,827	905,6	157,4	0,692
200,0	1129,0	1,58	0,811	909,9	158,6	0,691
220,0	1149,2	1,60	0,797	914,4	159,8	0,690
240,0	1169,1	1,63	0,783	919,1	161,0	0,688
260,0	1188,7	1,65	0,770	924,0	162,1	0,687
280,0	1208,0	1,68	0,757	929,0	163,3	0,686

3.4. Фтор

Для составления уравнения состояния фтора мы располагали данными о сжимаемости газообразного фтора из [121]. Авторы измерили сжимаемость фтора в диапазоне температур от 75 до 300 К и давлений от 0,0231 до 24 МПа. Погрешность данных составляет 0,1%.

По уравнению (1.3) проведена предварительная обработка данных, показавшая, что при использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6) достаточно точное описание экспериментальных данных получается в области температур выше 230 К. В табл. 3.10 приводятся результаты предварительных расчетов.

Таблица 3.10. Определение параметров потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для фтора в различных температурных интервалах

Температура, К	Число точек	Средняя квадратическая погрешность, %	$b_0 \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$\varepsilon/k, \text{ К}$
75—300	95	0,29	1,3264	107,60
160—300	58	0,10	1,2975	108,09
230—300	24	0,04	1,2680	108,33

В качестве окончательного варианта для получения уравнения состояния фтора использован последний вариант в табл. 3.10. На рис. 3.6 показана область обработки экспериментальных данных об удельных объемах фтора.

Приведенные вириальные коэффициенты потенциала Леннарда-Джонса (12-6) B^*, C^*, D^* и E^* аппроксимированы полиномами вида (2.1) — (2.4). Расчет поправки на неаддитивность в третьем вириальном коэффициенте показал, что эта поправка для фтора ничтожно мала, поэтому при составлении уравнения состояния использован аддитивный приведенный третий вириальный коэффициент.

Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных о коэффициенте сжимаемости фтора предлагаемым уравнением состояния составляет 0,036%.

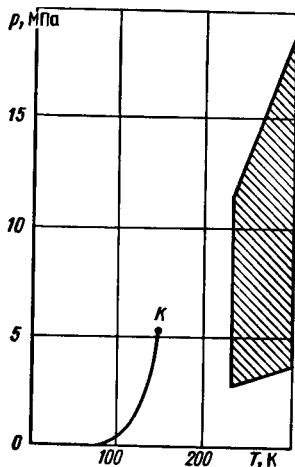


Рис. 3.6. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости фтора в газообразном состоянии

Так как экспериментальные данные о вязкости и теплопроводности фтора в интересующей нас области параметров состояния отсутствуют, то совместная обработка данных о сжимаемости и свойствах переноса не производилась. Для расчета таблиц теплофизических свойств использованы константы уравнения состояния, приведенные ниже.

Коэффициент динамической вязкости при атмосферном давлении рассчитан по уравнению Энскога (1.24), в котором использована аппроксимация $f/\Omega^{(2.2)*}$, приведенная в § 2.1.

Вязкость при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению с тремя членами ряда (1.25). Константы аппроксимации комплексов $B_{\eta}^* f_{\eta}/\Omega^{(2.2)*}$ и $C_{\eta}^* f_{\eta}/\Omega^{(2.2)*}$ использованы те же, что и в § 2.1.

Теплопроводность при пониженном давлении рассчитана по уравнению Мейсона и Мончика (1.27). Функция $\beta_0(T^*) = \sum m_i (\epsilon/(kT))^i$ для фтора аппроксимирована полиномом. Теплопроводность фтора при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению вида (1.25), в котором

$$B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*} = \sum_{j=1}^8 p_j (\epsilon/(kT))^j;$$

$$C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*} = \sum_{j=1}^6 q_j (\epsilon/(kT))^j.$$

Значения коэффициентов аппроксимации и соответствующих им степеней аргументов для $C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$ использованы те же, что и в § 2.1. Значения B_{λ}^* для фтора рассчитаны, и произведена их аппроксимация.

Для расчета калорических функций фтора использованы значения идеально-газовых функций по данным [42, 112]. Значения идеально-газовых функций аппроксимированы полиномами вида (3.2) в интервале 70—1100 К. За начало отсчета энтальпии принят 0 К. Получены следующие значения констант аппроксимации:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 4,62881033 \cdot 10^0 \\ \alpha_1 &= -8,20664478 \cdot 10^{-1} \\ \alpha_2 &= 2,52105188 \cdot 10^{-1} \\ \alpha_3 &= -4,11459926 \cdot 10^{-2} \\ \alpha_4 &= 3,70517498 \cdot 10^{-3} \\ \alpha_5 &= -1,73135527 \cdot 10^{-4} \\ \alpha_6 &= 3,26999627 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\beta_0 &= 4,78823089 \cdot 10^0 \\ \beta_1 &= -2,79739038 \cdot 10^{-1} \\ \beta_2 &= -7,96216193 \cdot 10^{-2} \\ \beta_3 &= 3,39267513 \cdot 10^{-2} \\ \beta_4 &= -4,45752034 \cdot 10^{-3} \\ \beta_5 &= 2,56340567 \cdot 10^{-4} \\ \beta_6 &= -5,50848910 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= 3,50628787 \cdot 10^1 \\ \gamma_1 &= -7,67754312 \cdot 10^0 \\ \gamma_2 &= 2,38573453 \cdot 10^0 \\ \gamma_3 &= -4,35002653 \cdot 10^{-1} \\ \gamma_4 &= 4,35634000 \cdot 10^{-2} \\ \gamma_5 &= -2,21839129 \cdot 10^{-3} \\ \gamma_6 &= 4,47923425 \cdot 10^{-5}\end{aligned}$$

Точность аппроксимации c_p^0/R составляет 0,1; $(h^0 - h_0^0)/RT - 0,04$ и $s^0/R - 0,19\%$.

Таблицы теплофизических свойств фтора рассчитаны в интервале 300—1000 К. Нижний предел таблиц по давлению определяется началом заметной диссоциации фтора. Диссоциация фтора происходит по схеме $F_2 \rightleftharpoons 2F$. Константа равновесия $k_p = p_F^2/p_{F_2}$ в предположении идеальности F_2 и F дана в зависимости от температуры в [42].

В качестве критерия выбора наименьшего давления, при котором возможен расчет таблиц при данной температуре, взято следующее условие: $(p_F/p_{F_2}) \cdot 100 \leq 0,5\%$. Рассчитанные значения минимальных давлений в соответ-

ствии с указанным условием следующие:

T, K	400	500	600	700	800	900	1000
$p_{мин}, МПа$	$7 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	0,26	4	36,5

При 900 и 1000 К приведенные значения являются ориентировочными, вследствие того, что оценка проведена по значению k_p , рассчитанному без учета реальности газа.

Верхняя граница таблиц по давлению определяется плотностью $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$, выше которой точность уравнения состояния с пятью вириальными коэффициентами снижается и значения термодинамических функций содержат значительную погрешность.

При обработке экспериментальных данных и расчете таблиц фтора использованы следующие значения физических констант:

масса моля $\mu = 37,9968 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 218,807 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6); $b_0 = 1,26800 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$;
 $\epsilon/k = 108,326833 \text{ К}$.

Константы аппроксимации вириальных коэффициентов:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 5,99149141 \cdot 10^{-1} & c_0 &= 2,43846242 \cdot 10^{-1} \\
 a_1 &= -6,91473629 \cdot 10^{-1} & c_1 &= 7,25418597 \cdot 10^{-1} \\
 a_2 &= -8,39099593 \cdot 10^0 & c_2 &= -3,32279306 \cdot 10^0 \\
 a_3 &= 2,06252913 \cdot 10^1 & c_3 &= 9,20305447 \cdot 10^0 \\
 a_4 &= -3,66271635 \cdot 10^1 & c_4 &= -1,01469910 \cdot 10^1 \\
 a_5 &= 4,21921628 \cdot 10^1 & c_5 &= 5,54006866 \cdot 10^0 \\
 a_6 &= -3,12862494 \cdot 10^1 & c_6 &= -1,81316434 \cdot 10^0 \\
 a_7 &= 1,42911865 \cdot 10^1 & & \\
 a_8 &= -3,64597613 \cdot 10^0 & & \\
 a_9 &= 3,96345407 \cdot 10^{-1} & & \\
 d_0 &= 6,27240901 \cdot 10^{-3} & e_0 &= 8,44759355 \cdot 10^{-1} \\
 d_1 &= 1,98980916 \cdot 10^0 & e_1 &= 1,59590766 \cdot 10^1 \\
 d_2 &= -1,26189800 \cdot 10^1 & e_2 &= -1,08295331 \cdot 10^2 \\
 d_3 &= 4,62769040 \cdot 10^1 & e_3 &= 3,69941916 \cdot 10^2 \\
 d_4 &= -1,16759341 \cdot 10^2 & e_4 &= -6,77677195 \cdot 10^2 \\
 d_5 &= 1,94064619 \cdot 10^2 & e_5 &= 6,28281990 \cdot 10^2 \\
 d_6 &= -1,91704442 \cdot 10^2 & e_6 &= -2,29928318 \cdot 10^2 \\
 d_7 &= 1,05851342 \cdot 10^2 & & \\
 d_8 &= -2,73812054 \cdot 10^1 & &
 \end{aligned}$$

Константы аппроксимации второго и третьего вириальных коэффициентов, а также комплекса $f/\Omega^{(2,2)*}$ приведены в § 2.1. Коэффициенты аппроксимации и степень аргументов для функций β_0 и $B_k^* f_k^{(3)}/\Omega^{(2,2)*}$ фтора приводятся ниже:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= -3,26596 \cdot 10^0 & s_1 &= 4 & p_1 &= 1,87002 \cdot 10^1 & s_1 &= 2,5 \\
 m_2 &= 4,20907 \cdot 10^0 & s_2 &= 3 & p_2 &= -3,99276 \cdot 10^1 & s_2 &= 2,0 \\
 m_3 &= -5,04769 \cdot 10^{-1} & s_3 &= 2 & p_3 &= 3,12712 \cdot 10^1 & s_3 &= 1,5 \\
 m_4 &= -1,32026 \cdot 10^0 & s_4 &= 1 & p_4 &= -1,19124 \cdot 10^1 & s_4 &= 1,0 \\
 m_5 &= 1,31558 \cdot 10^0 & s_5 &= 0 & p_5 &= 2,87623 \cdot 10^0 & s_5 &= 0,5 \\
 & & & & p_6 &= 2,50265 \cdot 10^{-1} & s_6 &= 0 \\
 & & & & p_7 &= -2,18103 \cdot 10^{-4} & s_7 &= -1,0 \\
 & & & & p_8 &= 6,90722 \cdot 10^{-5} & s_8 &= -1,5
 \end{aligned}$$

Результаты расчета теплофизических свойств фтора приведены в табл. 3.11 и 3.12.

Таблица 3.11. Фтор

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=300\text{ К}$						
0,1	1,52	0,9996	233,6	5,340	0,607	0,827
1,0	15,29	0,9963	232,2	4,833	0,609	0,837
2,0	30,68	0,9929	230,6	4,676	0,610	0,847
3,0	46,17	0,9898	229,0	4,583	0,611	0,858
4,0	61,74	0,9869	227,5	4,516	0,612	0,869
5,0	77,38	0,9844	225,9	4,463	0,614	0,880
6,0	93,06	0,9821	224,4	4,418	0,615	0,891
8,0	124,54	0,9786	221,5	4,347	0,617	0,913
10,0	156,02	0,9764	218,6	4,289	0,620	0,935
12,0	187,37	0,9756	215,8	4,241	0,622	0,956
16,0	249,12	0,9784	210,7	4,163	0,626	0,996
20,0	308,73	0,9868	206,2	4,100	0,630	1,031
25,0	379,02	1,0048	201,5	4,035	0,633	1,065
30,0	443,86	1,0296	197,7	3,982	0,636	1,090
35,0	503,09	1,0598	194,7	3,937	0,639	1,109
$T=400\text{ К}$						
0,1	1,14	1,0001	318,4	5,578	0,650	0,869
1,0	11,41	1,0009	317,6	5,072	0,651	0,874
2,0	22,80	1,0020	316,8	4,918	0,651	0,880
3,0	34,16	1,0032	316,0	4,827	0,652	0,885
4,0	45,49	1,0046	315,2	4,762	0,653	0,890
5,0	56,78	1,0061	314,4	4,711	0,654	0,895
6,0	68,03	1,0077	313,6	4,669	0,654	0,900
8,0	90,37	1,0114	312,1	4,601	0,655	0,911
10,0	112,49	1,0157	310,7	4,548	0,657	0,920
12,0	134,35	1,0205	309,4	4,505	0,658	0,930
16,0	177,17	1,0318	307,0	4,434	0,660	0,948
20,0	218,63	1,0452	304,8	4,378	0,663	0,964
25,0	268,29	1,0646	302,6	4,321	0,665	0,983
30,0	315,38	1,0868	300,8	4,273	0,668	0,998
35,0	359,84	1,1112	299,4	4,233	0,670	1,011
40,0	401,69	1,1377	298,4	4,198	0,672	1,023
45,0	441,03	1,1657	297,8	4,166	0,674	1,032
50,0	477,99	1,1951	297,4	4,138	0,676	1,040
60,0	545,45	1,2568	297,4	4,089	0,679	1,054
$T=500\text{ К}$						
0,1	0,91	1,0002	407,0	5,779	0,682	0,901
1,0	9,12	1,0024	406,6	5,274	0,683	0,904
2,0	18,19	1,0048	406,2	5,121	0,683	0,908
3,0	27,22	1,0073	405,8	5,031	0,684	0,911
4,0	36,20	1,0099	405,4	4,967	0,684	0,914
5,0	45,13	1,0126	405,0	4,917	0,685	0,917
6,0	54,01	1,0154	404,7	4,876	0,685	0,920
8,0	71,61	1,0211	404,0	4,810	0,686	0,926
10,0	88,99	1,0270	403,3	4,759	0,687	0,932
12,0	106,15	1,0333	402,7	4,717	0,688	0,937
16,0	139,73	1,0466	401,6	4,649	0,689	0,948
20,0	172,31	1,0609	400,8	4,596	0,691	0,957
25,0	211,57	1,0800	399,9	4,542	0,693	0,968
30,0	249,16	1,1005	399,4	4,497	0,695	0,978

Φ_{top}

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
35,0	285,08	1,1221	399,1	4,459	0,697	0,987
40,0	319,35	1,1448	399,0	4,426	0,699	0,995
45,0	352,02	1,1684	399,2	4,397	0,700	1,002
50,0	383,16	1,1927	399,6	4,370	0,702	1,008
60,0	441,11	1,2432	400,8	4,324	0,706	1,019
70,0	493,84	1,2956	402,7	4,285	0,709	1,029
80,0	541,97	1,3491	405,0	4,251	0,713	1,037

 $T=600 \text{ K}$

0,1	0,76	1,0003	498,5	5,952	0,706	0,925
1,0	7,60	1,0028	498,4	5,448	0,706	0,927
2,0	15,15	1,0057	498,2	5,295	0,707	0,929
3,0	22,66	1,0086	498,1	5,205	0,707	0,931
4,0	30,12	1,0115	497,9	5,142	0,707	0,933
5,0	37,54	1,0145	497,8	5,092	0,708	0,935
6,0	44,91	1,0176	497,7	5,051	0,708	0,937
8,0	59,52	1,0237	497,4	4,986	0,709	0,941
10,0	73,94	1,0301	497,2	4,936	0,709	0,945
12,0	88,18	1,0365	497,1	4,895	0,710	0,948
16,0	116,07	1,0499	496,9	4,829	0,711	0,955
20,0	143,19	1,0638	496,8	4,777	0,712	0,962
25,0	175,99	1,0820	496,9	4,725	0,714	0,969
30,0	207,58	1,1008	497,1	4,682	0,715	0,976
35,0	237,97	1,1202	497,6	4,645	0,717	0,982
40,0	267,19	1,1403	498,2	4,613	0,718	0,988
45,0	295,27	1,1608	499,0	4,584	0,720	0,993
50,0	322,25	1,1818	499,9	4,559	0,721	0,998
60,0	373,09	1,2249	502,1	4,515	0,724	1,006
70,0	420,08	1,2692	504,7	4,477	0,727	1,013
80,0	463,60	1,3144	507,8	4,444	0,730	1,019
90,0	504,00	1,3601	511,1	4,416	0,734	1,025
100,0	541,61	1,4063	514,7	4,390	0,737	1,030

 $T=700 \text{ K}$

0,1	0,65	1,0003	592,1	6,100	0,724	0,943
1,0	6,51	1,0029	592,1	5,596	0,724	0,944
2,0	12,98	1,0058	592,1	5,443	0,724	0,946
3,0	19,41	1,0088	592,1	5,354	0,725	0,947
4,0	25,81	1,0118	592,1	5,290	0,725	0,948
5,0	32,17	1,0148	592,2	5,241	0,725	0,950
6,0	38,49	1,0178	592,2	5,201	0,725	0,951
8,0	51,01	1,0239	592,3	5,136	0,726	0,954
10,0	63,37	1,0302	592,4	5,086	0,726	0,957
12,0	75,59	1,0365	592,6	5,045	0,727	0,959
16,0	99,55	1,0493	593,0	4,980	0,728	0,964
20,0	122,89	1,0625	593,4	4,929	0,728	0,969
25,0	151,22	1,0793	594,1	4,878	0,730	0,974
30,0	178,60	1,0966	595,0	4,836	0,731	0,979
35,0	205,07	1,1143	596,0	4,800	0,732	0,983
40,0	230,64	1,1322	597,1	4,769	0,733	0,988
45,0	255,35	1,1505	598,3	4,741	0,734	0,991
50,0	279,22	1,1691	599,6	4,716	0,735	0,995
60,0	324,59	1,2068	602,5	4,673	0,738	1,001
70,0	366,98	1,2453	605,8	4,636	0,740	1,006
80,0	406,66	1,2843	609,3	4,605	0,743	1,011

Φ_{top}

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
90,0	443,87	1,3238	613,2	4,576	0,745	1,015
100,0	478,83	1,3634	617,2	4,551	0,748	1,019
120,0	542,82	1,4433	625,8	4,503	0,754	1,025

 $T=800 \text{ K}$

1,0	5,70	1,0028	687,2	5,723	0,738	0,957
2,0	11,36	1,0057	687,4	5,570	0,738	0,958
3,0	16,99	1,0086	687,5	5,481	0,738	0,960
4,0	22,59	1,0115	687,7	5,418	0,738	0,961
5,0	28,16	1,0144	687,8	5,369	0,738	0,962
6,0	33,69	1,0173	688,0	5,328	0,739	0,963
8,0	44,66	1,0232	688,3	5,265	0,739	0,965
10,0	55,51	1,0291	688,7	5,215	0,739	0,967
12,0	66,22	1,0351	689,0	5,174	0,740	0,968
16,0	87,27	1,0473	689,8	5,110	0,740	0,972
20,0	107,82	1,0596	690,7	5,059	0,741	0,976
25,0	132,82	1,0752	691,9	5,009	0,742	0,980
30,0	157,06	1,0911	693,1	4,967	0,743	0,983
35,0	180,57	1,1073	694,5	4,932	0,744	0,987
40,0	203,37	1,1236	696,0	4,901	0,744	0,990
45,0	225,48	1,1401	697,5	4,874	0,745	0,993
50,0	246,93	1,1567	699,1	4,849	0,746	0,995
60,0	287,93	1,1904	702,6	4,807	0,748	1,000
70,0	326,56	1,2245	706,3	4,771	0,750	1,004
80,0	363,00	1,2589	710,3	4,739	0,752	1,008
90,0	397,44	1,2936	714,5	4,712	0,754	1,011
100,0	430,04	1,3284	718,8	4,687	0,756	1,014
120,0	490,31	1,3981	728,0	4,644	0,761	1,019
140,0	544,87	1,4678	737,8	4,608	0,767	1,023

 $T=900 \text{ K}$

5,0	25,04	1,0138	784,4	5,479	0,749	0,971
6,0	29,97	1,0165	784,7	5,438	0,749	0,972
8,0	39,74	1,0221	785,2	5,375	0,749	0,973
10,0	49,41	1,0277	785,7	5,325	0,750	0,975
12,0	58,96	1,0334	786,2	5,285	0,750	0,976
16,0	77,76	1,0448	787,3	5,221	0,750	0,979
20,0	96,14	1,0563	788,5	5,171	0,751	0,982
25,0	118,55	1,0708	790,0	5,120	0,752	0,985
30,0	140,33	1,0855	791,6	5,079	0,752	0,988
35,0	161,52	1,1003	793,3	5,044	0,753	0,990
40,0	182,12	1,1153	795,1	5,014	0,754	0,993
45,0	202,16	1,1303	796,9	4,987	0,754	0,995
50,0	221,65	1,1454	798,7	4,963	0,755	0,997
60,0	259,09	1,1759	802,6	4,921	0,756	1,001
70,0	294,58	1,2066	806,7	4,885	0,758	1,005
80,0	328,27	1,2375	811,0	4,854	0,759	1,008
90,0	360,29	1,2684	815,5	4,827	0,761	1,010
100,0	390,78	1,2994	820,1	4,802	0,763	1,012
120,0	447,60	1,3613	829,7	4,760	0,767	1,016
140,0	499,57	1,4230	839,7	4,724	0,771	1,018
160,0	547,37	1,4843	850,1	4,693	0,776	1,021

 $T=1000 \text{ K}$

40,0	165,04	1,1076	894,3	5,111	0,761	0,996
------	--------	--------	-------	-------	-------	-------

Фтор

p	ρ	z	h	s	c_p	c_p
50,0	201,26	1,1353	898,4	5,060	0,762	1,000
60,0	235,73	1,1632	902,7	5,019	0,763	1,003
70,0	268,56	1,1912	907,1	4,984	0,764	1,006
80,0	299,87	1,2192	911,6	4,953	0,766	1,008
90,0	329,78	1,2472	916,3	4,926	0,767	1,010
100,0	358,38	1,2752	921,1	4,902	0,768	1,012
120,0	412,04	1,3309	931,1	4,860	0,771	1,015
140,0	461,52	1,3863	941,3	4,824	0,775	1,017
160,0	507,38	1,4411	951,9	4,793	0,778	1,018

Таблица 3.12. **Фтор**

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

$T=300\text{ K}$

0,1	298,9	1,36	1,002	237,6	27,6	0,712
1,0	299,3	1,37	1,024	239,2	27,8	0,720
2,0	299,9	1,38	1,048	241,1	28,0	0,729
3,0	300,6	1,39	1,072	243,1	28,3	0,738
4,0	301,5	1,40	1,095	245,3	28,5	0,747
5,0	302,5	1,42	1,118	247,5	28,8	0,756
6,0	303,7	1,43	1,140	249,9	29,1	0,766
8,0	306,4	1,46	1,182	255,0	29,7	0,785
10,0	309,8	1,50	1,219	260,5	30,3	0,804
12,0	313,8	1,54	1,252	266,5	30,9	0,824
16,0	323,5	1,63	1,300	279,5	32,4	0,861
20,0	335,3	1,74	1,323	293,7	33,9	0,894
25,0	352,5	1,88	1,324	312,5	35,8	0,929
30,0	371,6	2,04	1,300	331,9	37,8	0,956
35,0	391,9	2,21	1,262	351,2	39,8	0,978

$T=400\text{ K}$

0,1	342,2	1,34	1,001	295,2	36,0	0,712
1,0	343,2	1,34	1,010	296,3	36,2	0,716
2,0	344,5	1,35	1,019	297,7	36,4	0,719
3,0	345,8	1,36	1,028	299,0	36,6	0,723
4,0	347,2	1,37	1,036	300,4	36,8	0,726
5,0	348,7	1,38	1,044	301,9	37,0	0,730
6,0	350,2	1,39	1,052	303,5	37,3	0,733
8,0	353,5	1,41	1,065	306,7	37,7	0,740
10,0	357,0	1,43	1,077	310,1	38,2	0,747
12,0	360,8	1,46	1,087	313,7	38,7	0,754
16,0	369,0	1,51	1,101	321,4	39,7	0,767
20,0	378,1	1,56	1,108	329,8	40,8	0,780
25,0	390,6	1,64	1,108	340,8	42,2	0,794
30,0	404,0	1,72	1,100	352,3	43,6	0,807
35,0	418,2	1,80	1,085	364,1	45,0	0,819
40,0	432,9	1,88	1,066	376,1	46,4	0,829
45,0	448,1	1,97	1,045	388,1	47,8	0,838
50,0	463,4	2,05	1,022	400,1	49,2	0,847
60,0	494,4	2,22	0,975	423,6	51,8	0,861

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=500\text{ K}$						
0,1	380,3	1,32	1,000	346,5	43,8	0,713
1,0	381,6	1,33	1,004	347,3	44,0	0,714
2,0	383,1	1,33	1,008	348,3	44,2	0,716
3,0	384,6	1,34	1,011	349,3	44,3	0,718
4,0	386,2	1,35	1,014	350,3	44,5	0,719
5,0	387,8	1,36	1,017	351,4	44,7	0,721
6,0	389,4	1,37	1,020	352,5	44,9	0,723
8,0	392,8	1,38	1,024	354,8	45,2	0,726
10,0	396,4	1,40	1,028	357,2	45,6	0,729
12,0	400,0	1,42	1,031	359,8	46,0	0,733
16,0	407,7	1,45	1,034	365,2	46,8	0,739
20,0	415,8	1,49	1,033	370,9	47,6	0,745
25,0	426,5	1,54	1,029	378,6	48,7	0,753
30,0	437,7	1,59	1,021	386,6	49,8	0,760
35,0	449,3	1,64	1,010	394,9	50,9	0,766
40,0	461,4	1,70	0,996	403,4	52,0	0,772
45,0	473,6	1,75	0,981	412,1	53,1	0,778
50,0	486,1	1,81	0,965	420,8	54,2	0,783
60,0	511,4	1,92	0,931	438,4	56,4	0,793
70,0	536,8	2,03	0,896	455,8	58,5	0,802
80,0	562,1	2,14	0,864	472,8	60,5	0,811
$T=600\text{ K}$						
0,1	414,9	1,31	1,000	393,3	51,1	0,713
1,0	416,3	1,32	1,001	393,9	51,2	0,713
2,0	417,8	1,32	1,002	394,7	51,3	0,714
3,0	419,4	1,33	1,003	395,4	51,5	0,715
4,0	421,1	1,33	1,004	396,2	51,6	0,716
5,0	422,7	1,34	1,005	397,1	51,8	0,717
6,0	424,4	1,35	1,005	397,9	52,0	0,718
8,0	427,8	1,36	1,006	399,7	52,3	0,720
10,0	431,2	1,37	1,006	401,5	52,6	0,721
12,0	434,8	1,39	1,006	403,4	52,9	0,723
16,0	442,0	1,42	1,004	407,5	53,6	0,726
20,0	449,6	1,45	1,000	411,8	54,3	0,730
25,0	459,3	1,48	0,994	417,5	55,1	0,734
30,0	469,3	1,52	0,985	423,5	56,0	0,738
35,0	479,6	1,56	0,975	429,8	56,9	0,742
40,0	490,1	1,60	0,963	436,3	57,8	0,745
45,0	500,7	1,65	0,950	442,9	58,7	0,749
50,0	511,5	1,69	0,937	449,7	59,7	0,752
60,0	533,3	1,77	0,909	463,5	61,5	0,758
70,0	555,2	1,85	0,880	477,3	63,2	0,764
80,0	577,0	1,93	0,852	491,2	65,0	0,770
90,0	598,7	2,01	0,824	504,9	66,7	0,776
100,0	620,0	2,08	0,798	518,5	68,3	0,782
$T=700\text{ K}$						
0,1	446,8	1,30	1,000	436,8	57,8	0,712
1,0	448,2	1,31	1,000	437,4	57,9	0,713
2,0	449,8	1,31	1,000	437,9	58,1	0,713
3,0	451,4	1,32	1,000	438,5	58,2	0,714

Φ_{top}

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
4,0	453,0	1,32	0,999	439,2	58,3	0,714
5,0	454,7	1,33	0,999	439,8	58,5	0,715
6,0	456,3	1,34	0,998	440,5	58,6	0,715
8,0	459,6	1,35	0,997	441,8	58,9	0,716
10,0	463,0	1,36	0,996	443,3	59,2	0,717
12,0	466,4	1,37	0,994	444,8	59,4	0,718
16,0	473,4	1,39	0,990	447,9	60,0	0,720
20,0	480,5	1,42	0,984	451,3	60,6	0,721
25,0	489,6	1,45	0,976	455,8	61,3	0,724
30,0	498,8	1,48	0,967	460,5	62,1	0,726
35,0	508,2	1,51	0,958	465,4	62,9	0,728
40,0	517,7	1,55	0,947	470,6	63,6	0,730
45,0	527,3	1,58	0,936	475,8	64,4	0,732
50,0	537,0	1,61	0,924	481,2	65,2	0,734
60,0	556,5	1,68	0,899	492,4	66,7	0,738
70,0	576,0	1,74	0,874	503,7	68,3	0,742
80,0	595,4	1,80	0,849	515,2	69,8	0,746
90,0	614,7	1,86	0,825	526,8	71,3	0,750
100,0	633,7	1,92	0,801	538,3	72,7	0,754
120,0	670,8	2,04	0,757	561,0	75,6	0,761

 $T=800 \text{ K}$

1,0	478,0	1,30	0,999	478,3	64,3	0,712
2,0	479,6	1,31	0,998	478,7	64,4	0,712
3,0	481,2	1,31	0,998	479,2	64,5	0,713
4,0	482,8	1,32	0,997	479,7	64,7	0,713
5,0	484,4	1,32	0,996	480,2	64,8	0,713
6,0	486,0	1,33	0,995	480,8	64,9	0,713
8,0	489,2	1,34	0,992	481,8	65,1	0,714
10,0	492,5	1,35	0,990	483,0	65,4	0,714
12,0	495,8	1,36	0,987	484,2	65,6	0,714
16,0	502,5	1,38	0,982	486,7	66,1	0,715
20,0	509,3	1,40	0,976	489,4	66,7	0,716
25,0	517,9	1,42	0,967	492,9	67,3	0,717
30,0	526,6	1,45	0,958	496,7	68,0	0,719
35,0	535,3	1,48	0,949	500,7	68,6	0,720
40,0	544,2	1,51	0,939	504,9	69,3	0,721
45,0	553,0	1,53	0,929	509,2	70,0	0,722
50,0	562,0	1,56	0,918	513,6	70,7	0,723
60,0	579,8	1,61	0,896	522,7	72,0	0,726
70,0	597,6	1,67	0,874	532,2	73,4	0,729
80,0	615,3	1,72	0,852	541,9	74,7	0,731
90,0	632,8	1,77	0,830	551,7	76,1	0,733
100,0	650,0	1,82	0,809	561,5	77,4	0,736
120,0	683,7	1,91	0,768	581,3	79,9	0,741
140,0	716,1	2,00	0,730	600,9	82,4	0,746

 $T=900 \text{ K}$

5,0	512,3	1,31	0,994	518,7	70,8	0,712
6,0	513,9	1,32	0,993	519,2	70,9	0,712
8,0	517,0	1,33	0,990	520,0	71,1	0,712
10,0	520,2	1,34	0,987	520,9	71,3	0,712
12,0	523,4	1,35	0,984	521,9	71,5	0,712
16,0	529,9	1,36	0,978	523,9	72,0	0,712

Фтор

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	536,4	1,38	0,971	526,1	72,5	0,713
25,0	544,6	1,41	0,963	529,0	73,0	0,713
30,0	552,8	1,43	0,954	532,1	73,6	0,714
35,0	561,1	1,45	0,945	535,3	74,2	0,714
40,0	569,4	1,48	0,935	538,7	74,8	0,715
45,0	577,7	1,50	0,926	542,3	75,4	0,716
50,0	586,1	1,52	0,916	546,0	76,0	0,716
60,0	602,7	1,57	0,896	553,6	77,2	0,718
70,0	619,3	1,61	0,876	561,6	78,4	0,719
80,0	635,7	1,66	0,856	569,8	79,7	0,721
90,0	651,8	1,70	0,837	578,2	80,9	0,722
100,0	667,8	1,74	0,817	586,7	82,0	0,724
120,0	698,8	1,82	0,780	604,0	84,4	0,727
140,0	728,6	1,89	0,745	621,4	86,6	0,730
160,0	757,1	1,96	0,711	638,7	88,8	0,734

$T=1000\text{ K}$

40,0	593,6	1,45	0,934	572,0	80,2	0,711
50,0	609,4	1,49	0,916	578,1	81,2	0,711
60,0	625,1	1,54	0,898	584,5	82,3	0,712
70,0	640,7	1,57	0,879	591,3	83,4	0,713
80,0	656,1	1,61	0,861	598,3	84,5	0,714
90,0	671,2	1,65	0,843	605,5	85,6	0,714
100,0	686,1	1,69	0,826	612,9	86,7	0,715
120,0	715,1	1,76	0,792	628,1	88,8	0,717
140,0	742,8	1,82	0,759	643,6	90,9	0,720
160,0	769,3	1,88	0,729	659,1	93,0	0,722

3.5. Воздух

Теоретически обоснованное уравнение состояния воздуха составлено на основе экспериментальных данных об удельном объеме, полученных на кафедре теоретических основ теплотехники Московского энергетического института [20]. Ранее экспериментальные определения удельных объемов воздуха были выполнены в основном в трех работах. Ниже приводится краткая характеристика этих работ.

Таблица 3.13. Работы по определению удельного объема воздуха

$\Delta T, \text{ K}$	$\Delta p, \text{ МПа}$	Авторы	Литература
273 - 473	20 - 300	Амага (1893)	[113]
273 - 473	2 - 10	Гольборн, Шультце (1915)	[122]
273 - 348	26 - 225	Михельс, Вассенаар, Севентер (1953)	[123]
323 - 873	2 - 70	Зубарев (1975)	[25]

В [25] получено 350 значений удельного объема воздуха с погрешностью, не превышающей 0,1—0,15%.

Погрешность данных [123 и 122] составляет соответственно 0,05 и 0,2%.

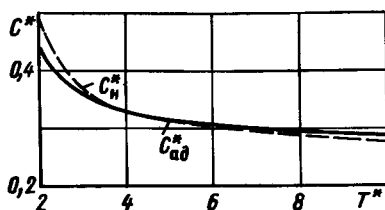


Рис. 3.7. Неаддитивный третий вириальный коэффициент воздуха C_{a0}^{*}

Сравнение данных [25] с экспериментальными данными Михельса при температуре 323,15 К показало, что последние расходятся на 0,01—0,04%.

Точность данных Амага [113], очевидно, невысока, так как разброс их составляет до 1%.

Изданные в различных странах таблицы термодинамических свойств воздуха [36, 79, 124] описывают область параметров свойств, значительно превосходящую область экспериментального исследования. Однако большой интервал экстраполяции таблиц, основанных на эмпирических уравнениях, приводит к значительным расхождениям в термодинамических свойствах; при высоких температурах значения удельных объемов расходятся на несколько процентов.

Составление теоретически обоснованного уравнения состояния позволяет провести более надежную экстраполяцию его за пределы области экспериментального исследования.

Для получения уравнения состояния воздуха применялся потенциал Леннарда-Джонса (12-6). При этом данный потенциал использовался как эффективный потенциал для описания термодинамической поверхности воздуха целиком, а не отдельных компонентов. Уравнение состояния получено в виде (1.3) на основе экспериментальных данных, приведенных в [25]. Обработано 258 точек в интервале плотностей $\rho = 0 \div 320 \text{ кг/м}^3$. Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных полученным уравнением по сжимаемости $\delta z = 0,050\%$. При составлении уравнения состояния использованы значения констант полиномов, аппроксимирующих приведенные вириальные коэффициенты B^* , D^* и E^* , рассмотренные в § 2.1.

Третий вириальный коэффициент воздуха рассчитан с учетом поправки на неаддитивность с помощью [11 и 15] применительно к модельному потенциалу Леннарда-Джонса (12-6). Поляризуемость для воздуха принята равной $1,73 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$. Неаддитивный третий вириальный коэффициент воздуха представлен на рис. 3.7.

Рассчитанные значения неаддитивного третьего вириального коэффициента аппроксимированы полиномом по обратным степеням приведенной температуры в интервале $T^* = 2 \div 20$, т. е. получены константы выражения $C_{a0}^{*} = \sum_{i=0}^8 c_i (1/T^*)^i$.

Константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для полученного уравнения состояния имеют следующие значения: $\epsilon/k = (100,88 \pm 0,05) \text{ К}$; $b_0 = (2,0246 \pm 0,0007) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Для получения единых констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) применена методика перепривбликации, изложенная в § 1.5. В качестве обрабатываемого материала использовано представленное выше теоретически обоснованное уравнение состояния, а также данные [125 и 126]. Единые константы потенциала получены минимизацией интеграла (1.20).

Уравнения для вязкости и теплопроводности разреженного газа приняты в виде (1.24) и (1.27). Константы зависимости $f_n^{(3)}/\Omega^{(2,2)*} = f(T^*)$ использованы те

же, что и в § 1.5. Значения $\beta_0(T^*)$ для воздуха рассчитаны и представлены в

$$\text{виде полинома } \beta_0 = \sum_{i=1}^6 m_i \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{s_i}.$$

Уравнения для вязкости и теплопроводности воздуха при повышенном давлении приняты в виде вириальных уравнений вида (1.25). Константы полиномов, аппроксимирующих вириальные коэффициенты B'_η , C'_η и C'_λ , приведены в § 2.1. Значения второго теплопроводностного вириального коэффициента для воздуха рассчитаны по [22], и комплекс $B'_\lambda = B'_\lambda f_\lambda^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$

$$\text{аппроксимирован полиномом } B'_\lambda = \sum_{j=1}^6 p_j (\varepsilon/(kT))^{s_j}.$$

Средние квадратические погрешности описания заложенных в единое уравнение экспериментальных данных для воздуха составляют, %: $\delta z = 0,16$; $\delta \eta_0 = 0,86$; $\delta \eta = 0,40$.

Единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) мало отличаются от констант уравнения состояния, полученных при обработке только данных о сжимаемости.

Таблицы теплофизических свойств воздуха рассчитаны от 500 до 2500 К. Максимальные давления на изотермах определяются плотностью $\rho = 320 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Значения идеально-газовых функций взяты по данным [36]. Для возможности использования их при расчете таблиц они были аппроксимированы эмпирическими полиномами по обратным степеням температуры (3.2). В качестве аргумента использована величина $\tau = 100,09/T$. Значения констант полиномов следующие:

$\alpha_0 = 4,6266224 \cdot 10^{-1}$	$\beta_0 = 4,762398 \cdot 10^0$	$\gamma_0 = 3,871927 \cdot 10^1$
$\alpha_1 = -2,106755 \cdot 10^1$	$\beta_1 = -6,838149 \cdot 10^0$	$\gamma_1 = -2,404356 \cdot 10^2$
$\alpha_2 = 1,793046 \cdot 10^2$	$\beta_2 = -4,551821 \cdot 10^1$	$\gamma_2 = 2,516119 \cdot 10^3$
$\alpha_3 = -9,051830 \cdot 10^2$	$\beta_3 = 4,730326 \cdot 10^2$	$\gamma_3 = -1,719990 \cdot 10^4$
$\alpha_4 = 2,910789 \cdot 10^3$	$\beta_4 = -1,282505 \cdot 10^3$	$\gamma_4 = 7,303520 \cdot 10^4$
$\alpha_5 = -5,907846 \cdot 10^3$	$\beta_5 = 2,975458 \cdot 10^2$	$\gamma_5 = -1,855024 \cdot 10^5$
$\alpha_6 = 6,919208 \cdot 10^3$	$\beta_6 = 3,753749 \cdot 10^3$	$\gamma_6 = 2,572047 \cdot 10^5$
$\alpha_7 = -3,558081 \cdot 10^3$	$\beta_7 = -4,340649 \cdot 10^3$	$\gamma_7 = -1,493634 \cdot 10^5$

Таблицы описывают теплофизические свойства газообразного сухого воздуха естественного состава, включающего 78,08% азота, 20,96% кислорода, 0,93% аргона, 0,03% диоксида углерода. При расчете таблиц использованы следующие значения физических констант воздуха:

масса моля $\mu = 28,96 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 287,1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 253400 \text{ Дж/кг}$;

единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\varepsilon/k = 100,36514 \text{ К}$;
 $b_0 = 2,0226015 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Для расчета таблиц теплофизических свойств воздуха имеется уравнение состояния с пятью вириальными коэффициентами. Аппроксимация B^* , D^* и E^* приведена в § 2.1. Константы аппроксимации неаддитивного третьего вириального коэффициента:

$c_0 = 7,56415672 \cdot 10^{-2}$	$c_5 = 1,87470441 \cdot 10^3$
$c_1 = 4,60351629 \cdot 10^0$	$c_6 = -2,47551102 \cdot 10^3$
$c_2 = -4,40788857 \cdot 10^1$	$c_7 = 1,81243222 \cdot 10^3$
$c_3 = 2,49790257 \cdot 10^2$	$c_8 = -5,64074752 \cdot 10^2$
$c_4 = -8,63548867 \cdot 10^2$	

Для расчета вязкости и теплопроводности при атмосферном давлении используется аппроксимация $f_\lambda^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$, приведенная в § 2.1, а константы аппроксимации функции β_0 приводятся ниже.

Расчет вязкости и теплопроводности воздуха при повышенном давлении производится по соответствующим вириальным уравнениям. Константы аппроксимации B'_η , C'_η и C'_λ приведены в § 2.1.

Константы аппроксимации и соответствующие степени аргументов для β_0 и B_λ :

$$\begin{array}{llll} m_1 = 1,36750 \cdot 10^3 & s_1 = 5 & p_1 = -3,67497 \cdot 10^1 & s_1 = 2,0 \\ m_2 = -1,19508 \cdot 10^3 & s_2 = 4 & p_2 = 3,70974 \cdot 10^1 & s_2 = 1,5 \\ m_3 = 3,75621 \cdot 10^2 & s_3 = 3 & p_3 = -1,52851 \cdot 10^1 & s_3 = 1,0 \\ m_4 = -4,31787 \cdot 10^1 & s_4 = 2 & p_4 = 3,72976 \cdot 10^0 & s_4 = 0,5 \\ m_5 = -1,03820 \cdot 10^0 & s_5 = 1 & p_5 = 1,86381 \cdot 10^{-1} & s_5 = 0 \\ m_6 = 1,74227 \cdot 10^0 & s_6 = 0 & p_6 = -8,06834 \cdot 10^{-6} & s_6 = -1,0 \end{array}$$

Рассчитанные значения теплофизических свойств воздуха приведены в табл. 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14. Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
-----	--------	-----	-----	-----	-------	-------

$T=500$ K

0,1	0,70	1,0003	756,9	7,388	0,742	1,030
1,0	6,94	1,0035	756,5	6,725	0,743	1,034
2,0	13,84	1,0070	756,0	6,524	0,744	1,039
3,0	20,68	1,0107	755,5	6,405	0,744	1,043
4,0	27,47	1,0145	755,1	6,321	0,745	1,047
5,0	34,20	1,0184	754,7	6,255	0,746	1,052
6,0	40,88	1,0224	754,4	6,201	0,746	1,056
8,0	54,07	1,0308	753,7	6,115	0,747	1,064
10,0	67,01	1,0395	753,1	6,047	0,749	1,071
12,0	79,72	1,0486	752,7	5,992	0,750	1,078
16,0	104,37	1,0679	752,0	5,903	0,752	1,091
20,0	127,99	1,0885	751,8	5,834	0,754	1,103
25,0	156,07	1,1159	751,9	5,763	0,757	1,115
30,0	182,57	1,1447	752,6	5,706	0,760	1,125
35,0	207,54	1,1748	753,6	5,656	0,762	1,133
40,0	231,08	1,2059	755,0	5,614	0,765	1,140
45,0	253,27	1,2377	756,8	5,576	0,767	1,146
50,0	274,21	1,2702	758,8	5,542	0,770	1,151
60,0	312,73	1,3365	763,6	5,483	0,774	1,159

$T=600$ K

0,1	0,58	1,0004	860,9	7,579	0,764	1,052
1,0	5,78	1,0038	860,8	6,916	0,765	1,054
2,0	11,52	1,0077	860,7	6,716	0,765	1,057
3,0	17,22	1,0116	860,6	6,598	0,766	1,060
4,0	22,86	1,0156	860,6	6,515	0,766	1,063
5,0	28,47	1,0196	860,5	6,449	0,767	1,066
6,0	34,02	1,0237	860,5	6,396	0,767	1,069
8,0	45,00	1,0321	860,5	6,311	0,768	1,074
10,0	55,78	1,0407	860,5	6,245	0,769	1,079
12,0	66,38	1,0495	860,7	6,190	0,770	1,084
16,0	87,00	1,0676	861,1	6,103	0,772	1,093
20,0	106,87	1,0864	861,8	6,036	0,774	1,101
25,0	130,65	1,1108	863,0	5,967	0,776	1,110
30,0	153,30	1,1360	864,5	5,911	0,778	1,118

Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
35,0	174,87	1,1619	866,3	5,863	0,780	1,124
40,0	195,40	1,1884	868,4	5,822	0,782	1,130
45,0	214,95	1,2153	870,7	5,785	0,784	1,135
50,0	233,58	1,2426	873,2	5,752	0,786	1,140
60,0	268,31	1,2982	878,7	5,695	0,790	1,147
70,0	300,03	1,3544	884,9	5,646	0,794	1,153

$T=700$ K

0,1	0,50	1,0004	967,3	7,743	0,788	1,076
1,0	4,96	1,0038	967,4	7,081	0,789	1,077
2,0	9,88	1,0076	967,6	6,882	0,789	1,080
3,0	14,76	1,0115	967,7	6,764	0,789	1,082
4,0	19,60	1,0154	967,9	6,681	0,790	1,084
5,0	24,41	1,0193	968,1	6,616	0,790	1,086
6,0	29,18	1,0233	968,3	6,563	0,791	1,088
8,0	38,60	1,0313	968,7	6,479	0,792	1,092
10,0	47,87	1,0394	969,2	6,413	0,792	1,095
12,0	56,99	1,0477	969,8	6,359	0,793	1,099
16,0	74,79	1,0645	971,0	6,274	0,795	1,105
20,0	92,00	1,0817	972,4	6,207	0,796	1,111
25,0	112,71	1,1037	974,3	6,140	0,798	1,118
30,0	132,55	1,1262	976,5	6,085	0,800	1,124
35,0	151,56	1,1491	978,9	6,038	0,802	1,130
40,0	169,79	1,1723	981,5	5,997	0,804	1,134
45,0	187,26	1,1958	984,3	5,961	0,805	1,139
50,0	204,02	1,2195	987,2	5,928	0,807	1,142
60,0	235,55	1,2675	993,5	5,872	0,810	1,149
70,0	264,68	1,3159	1000,2	5,825	0,814	1,154
80,0	291,69	1,3647	1007,2	5,784	0,817	1,159
90,0	316,82	1,4135	1014,6	5,747	0,820	1,163

$T=800$ K

0,1	0,44	1,0004	1076,0	7,888	0,812	1,099
1,0	4,34	1,0036	1076,3	7,226	0,812	1,101
2,0	8,64	1,0073	1076,6	7,027	0,813	1,102
3,0	12,92	1,0110	1077,0	6,910	0,813	1,104
4,0	17,16	1,0147	1077,4	6,827	0,813	1,105
5,0	21,38	1,0184	1077,7	6,762	0,814	1,107
6,0	25,56	1,0222	1078,1	6,709	0,814	1,108
8,0	33,83	1,0297	1078,9	6,625	0,815	1,111
10,0	41,97	1,0373	1079,7	6,560	0,815	1,114
12,0	50,00	1,0450	1080,5	6,507	0,816	1,117
16,0	65,68	1,0606	1082,3	6,422	0,818	1,122
20,0	80,90	1,0764	1084,2	6,356	0,819	1,126
25,0	99,28	1,0964	1086,8	6,289	0,820	1,132
30,0	116,97	1,1167	1089,5	6,235	0,822	1,136
35,0	134,00	1,1372	1092,4	6,189	0,824	1,141
40,0	150,40	1,1579	1095,4	6,149	0,825	1,145
45,0	166,20	1,1788	1098,6	6,113	0,827	1,148
50,0	181,43	1,1999	1101,9	6,081	0,828	1,151
60,0	210,29	1,2423	1108,7	6,026	0,831	1,157
70,0	237,18	1,2850	1115,9	5,979	0,834	1,162
80,0	262,32	1,3278	1123,4	5,938	0,837	1,166

Воздух

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
90,0	285,88	1,3707	1131,1	5,902	0,839	1,169
100,0	308,01	1,4135	1139,0	5,870	0,842	1,172

T=900 K

0,1	0,39	1,0003	1187,0	8,018	0,834	1,121
1,0	3,86	1,0035	1187,4	7,356	0,834	1,122
2,0	7,69	1,0069	1187,9	7,157	0,835	1,123
3,0	11,49	1,0104	1188,4	7,040	0,835	1,125
4,0	15,27	1,0139	1188,9	6,957	0,835	1,126
5,0	19,02	1,0174	1189,4	6,892	0,835	1,127
6,0	22,75	1,0209	1189,9	6,839	0,836	1,128
8,0	30,12	1,0279	1190,9	6,756	0,836	1,130
10,0	37,39	1,0350	1192,0	6,691	0,837	1,133
12,0	44,56	1,0422	1193,1	6,638	0,838	1,135
16,0	58,61	1,0566	1195,3	6,554	0,839	1,139
20,0	72,26	1,0711	1197,6	6,488	0,840	1,142
25,0	88,81	1,0894	1200,7	6,422	0,841	1,146
30,0	104,80	1,1079	1203,8	6,368	0,843	1,150
35,0	120,24	1,1265	1207,1	6,323	0,844	1,154
40,0	135,17	1,1453	1210,5	6,283	0,845	1,157
45,0	149,60	1,1642	1214,0	6,248	0,847	1,160
50,0	163,56	1,1831	1217,5	6,216	0,848	1,163
60,0	190,15	1,2212	1224,9	6,161	0,851	1,168
70,0	215,11	1,2594	1232,5	6,115	0,853	1,172
80,0	238,59	1,2977	1240,4	6,075	0,855	1,175
90,0	260,72	1,3359	1248,5	6,039	0,858	1,178
100,0	281,63	1,3742	1256,7	6,007	0,860	1,181

T=1000 K

0,1	0,35	1,0003	1300,1	8,136	0,854	1,141
1,0	3,47	1,0032	1300,7	7,474	0,854	1,142
5,0	17,14	1,0163	1303,0	7,011	0,855	1,146
10,0	33,73	1,0328	1306,1	6,810	0,856	1,150
20,0	65,34	1,0662	1312,6	6,608	0,859	1,158
30,0	94,99	1,1000	1319,5	6,489	0,861	1,164
40,0	122,83	1,1342	1326,8	6,404	0,864	1,170
50,0	149,02	1,1687	1334,4	6,338	0,866	1,175
60,0	173,69	1,2032	1342,2	6,284	0,868	1,179
70,0	196,97	1,2379	1350,2	6,238	0,870	1,182
80,0	218,98	1,2725	1358,4	6,198	0,872	1,185
90,0	239,82	1,3071	1366,8	6,163	0,874	1,188
100,0	259,61	1,3417	1375,3	6,131	0,876	1,191
120,0	296,35	1,4104	1392,5	6,076	0,880	1,195

T=1100 K

0,1	0,32	1,0003	1415,1	8,245	0,872	1,159
1,0	3,16	1,0030	1415,7	7,583	0,872	1,159
5,0	15,59	1,0153	1418,4	7,120	0,873	1,162
10,0	30,72	1,0307	1421,9	6,920	0,874	1,166
20,0	59,65	1,0617	1429,1	6,719	0,876	1,172
30,0	86,91	1,0930	1436,6	6,600	0,878	1,177
40,0	112,63	1,1245	1444,4	6,516	0,880	1,182

Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
50,0	136,94	1,1562	1452,4	6,450	0,882	1,186
60,0	159,95	1,1878	1460,6	6,396	0,884	1,190
70,0	181,75	1,2195	1469,0	6,350	0,886	1,193
80,0	202,46	1,2512	1477,5	6,311	0,888	1,195
90,0	222,16	1,2828	1486,1	6,276	0,889	1,198
100,0	240,92	1,3143	1494,8	6,245	0,891	1,200
120,0	275,94	1,3770	1512,4	6,190	0,895	1,204
140,0	308,02	1,4392	1530,3	6,144	0,898	1,207

$T=1200$ K

0,1	0,29	1,0003	1531,8	8,346	0,887	1,174
1,0	2,89	1,0029	1532,5	7,685	0,887	1,175
5,0	14,31	1,0143	1535,4	7,222	0,888	1,177
10,0	28,21	1,0287	1539,2	7,022	0,889	1,180
20,0	54,88	1,0577	1547,0	6,821	0,891	1,185
30,0	80,12	1,0868	1555,0	6,708	0,893	1,190
40,0	104,04	1,1160	1563,2	6,619	0,895	1,193
50,0	126,73	1,1452	1571,6	6,554	0,896	1,197
60,0	148,28	1,1745	1580,1	6,500	0,898	1,200
70,0	168,80	1,2037	1588,8	6,455	0,900	1,203
80,0	188,35	1,2328	1597,5	6,415	0,901	1,205
90,0	207,01	1,2619	1606,4	6,380	0,903	1,207
100,0	224,84	1,2909	1615,3	6,349	0,904	1,209
120,0	258,27	1,3486	1633,3	6,295	0,907	1,213
140,0	289,06	1,4058	1651,5	6,250	0,910	1,216
160,0	317,57	1,4624	1669,8	6,210	0,913	1,218

$T=1300$ K

0,1	0,27	1,0003	1650,0	8,441	0,901	1,188
1,0	2,67	1,0027	1650,7	7,780	0,901	1,189
5,0	13,22	1,0135	1653,9	7,317	0,902	1,191
10,0	26,09	1,0270	1657,9	7,117	0,903	1,193
20,0	50,84	1,0541	1666,1	6,917	0,904	1,197
30,0	74,34	1,0812	1674,5	6,799	0,906	1,201
40,0	96,69	1,1084	1683,1	6,716	0,908	1,204
50,0	117,97	1,1356	1691,8	6,650	0,909	1,207
60,0	138,25	1,1628	1700,6	6,597	0,911	1,210
70,0	157,62	1,1899	1709,5	6,552	0,912	1,212
80,0	176,14	1,2169	1718,5	6,513	0,913	1,214
90,0	193,86	1,2439	1727,5	6,478	0,915	1,216
100,0	210,85	1,2707	1736,7	6,447	0,916	1,218
120,0	242,81	1,3241	1755,0	6,393	0,919	1,221
140,0	272,39	1,3771	1773,5	6,348	0,921	1,223
160,0	299,89	1,4295	1792,0	6,308	0,924	1,226

$T=1400$ K

0,1	0,25	1,0003	1769,5	8,531	0,913	1,200
1,0	2,48	1,0025	1770,2	7,869	0,913	1,201
5,0	12,28	1,0127	1773,6	7,407	0,914	1,202
10,0	24,26	1,0254	1777,8	7,207	0,915	1,204
20,0	47,35	1,0508	1786,4	7,007	0,916	1,208
30,0	69,35	1,0763	1795,2	6,890	0,918	1,211
40,0	90,33	1,1017	1804,0	6,806	0,919	1,214

Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
50,0	110,37	1,1271	1813,0	6,741	0,920	1,216
60,0	129,53	1,1525	1822,1	6,688	0,922	1,218
70,0	147,87	1,1778	1831,2	6,643	0,923	1,220
80,0	165,45	1,2030	1840,4	6,604	0,924	1,222
90,0	182,33	1,2281	1849,6	6,569	0,925	1,224
100,0	198,54	1,2531	1858,9	6,538	0,927	1,225
120,0	229,15	1,3029	1877,5	6,485	0,929	1,228
140,0	257,60	1,3521	1896,2	6,439	0,931	1,231
160,0	284,14	1,4009	1914,9	6,400	0,933	1,233
180,0	309,00	1,4493	1933,7	6,365	0,935	1,235

$T=1500$ K

0,1	0,23	1,0002	1890,1	8,615	0,924	1,211
1,0	2,32	1,0024	1890,9	7,954	0,924	1,212
5,0	11,47	1,0120	1894,4	7,491	0,925	1,213
10,0	22,68	1,0239	1898,8	7,292	0,926	1,215
20,0	44,32	1,0479	1907,8	7,092	0,927	1,218
30,0	64,99	1,0718	1916,8	6,974	0,928	1,220
40,0	84,77	1,0957	1925,9	6,891	0,929	1,222
50,0	103,70	1,1196	1935,1	6,826	0,930	1,225
60,0	121,86	1,1433	1944,4	6,773	0,932	1,227
70,0	139,28	1,1670	1953,7	6,728	0,933	1,228
80,0	156,02	1,1906	1963,0	6,689	0,934	1,230
90,0	172,12	1,2142	1972,4	6,655	0,935	1,231
100,0	187,63	1,2376	1981,8	6,624	0,936	1,233
120,0	216,99	1,2841	2000,7	6,571	0,938	1,235
140,0	244,38	1,3303	2019,6	6,526	0,940	1,237
160,0	270,02	1,3759	2038,6	6,486	0,942	1,239
180,0	294,11	1,4212	2057,5	6,452	0,944	1,241
200,0	316,80	1,4659	2076,4	6,421	0,945	1,242

$T=1750$ K

0,1	0,20	1,0002	2196,0	8,805	0,947	1,234
1,0	1,99	1,0021	2196,8	8,144	0,947	1,234
5,0	9,85	1,0105	2200,6	7,682	0,947	1,235
10,0	19,50	1,0209	2205,4	7,483	0,948	1,236
20,0	38,21	1,0417	2214,9	7,283	0,949	1,238
30,0	56,20	1,0625	2224,5	7,166	0,950	1,240
40,0	73,49	1,0833	2234,1	7,083	0,950	1,241
50,0	90,15	1,1038	2243,7	7,019	0,951	1,243
60,0	106,20	1,1245	2253,4	6,966	0,952	1,244
70,0	121,69	1,1450	2263,0	6,921	0,953	1,245
80,0	136,64	1,1653	2272,7	6,882	0,954	1,246
90,0	151,08	1,1857	2282,4	6,848	0,955	1,248
100,0	165,06	1,2059	2292,1	6,818	0,955	1,249
120,0	191,69	1,2460	2311,6	6,765	0,957	1,250
140,0	216,72	1,2858	2331,0	6,720	0,958	1,252
160,0	240,32	1,3251	2350,3	6,681	0,960	1,253
180,0	262,63	1,3641	2369,6	6,646	0,961	1,255
200,0	283,77	1,4028	2388,9	6,615	0,962	1,256
220,0	303,87	1,4410	2408,0	6,587	0,964	1,257

$T=2000$ K

0,1	0,17	1,0002	2506,7	8,972	0,964	1,251
-----	------	--------	--------	-------	-------	-------

Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
1,0	1,74	1,0019	2507,6	8,311	0,964	1,251
5,0	8,63	1,0093	2511,5	7,848	0,964	1,252
10,0	17,10	1,0185	2516,5	7,649	0,965	1,252
20,0	33,59	1,0369	2526,4	7,450	0,965	1,254
30,0	49,51	1,0552	2536,3	7,333	0,966	1,255
40,0	64,89	1,0735	2546,3	7,250	0,967	1,256
50,0	79,76	1,0917	2556,2	7,186	0,967	1,257
60,0	94,15	1,1098	2566,2	7,133	0,968	1,258
70,0	108,09	1,1279	2576,1	7,089	0,969	1,259
80,0	121,60	1,1458	2586,1	7,050	0,969	1,260
90,0	134,69	1,1637	2596,0	7,016	0,970	1,261
100,0	147,41	1,1814	2605,9	6,986	0,971	1,261
120,0	171,76	1,2168	2625,7	6,933	0,972	1,263
140,0	194,79	1,2517	2645,5	6,888	0,973	1,264
160,0	216,62	1,2864	2665,2	6,849	0,974	1,265
180,0	237,37	1,3207	2684,8	6,815	0,975	1,266
200,0	257,12	1,3546	2704,3	6,784	0,976	1,267
220,0	275,98	1,3883	2723,7	6,756	0,977	1,268
240,0	294,00	1,4217	2743,1	6,731	0,978	1,269
260,0	311,27	1,4547	2762,3	6,708	0,979	1,270

$T=2250$ K

0,1	0,15	1,0002	2821,0	9,118	0,978	1,265
1,0	1,55	1,0017	2821,9	8,456	0,978	1,265
5,0	7,68	1,0083	2826,0	7,994	0,978	1,265
10,0	15,23	1,0165	2831,1	7,795	0,978	1,266
20,0	29,97	1,0330	2841,3	7,596	0,979	1,267
30,0	44,26	1,0494	2851,5	7,479	0,979	1,267
40,0	58,10	1,0657	2861,7	7,397	0,980	1,268
50,0	71,54	1,0820	2871,8	7,332	0,980	1,269
60,0	84,58	1,0982	2882,0	7,280	0,981	1,270
70,0	97,25	1,1143	2892,1	7,235	0,981	1,270
80,0	109,57	1,1303	2902,3	7,197	0,982	1,271
90,0	121,55	1,1462	2912,4	7,163	0,982	1,272
100,0	133,21	1,1621	2922,5	7,132	0,983	1,272
120,0	155,63	1,1936	2942,6	7,080	0,984	1,273
140,0	176,94	1,2243	2962,6	7,035	0,984	1,274
160,0	197,24	1,2558	2982,5	6,996	0,985	1,275
180,0	216,61	1,2864	3002,4	6,962	0,986	1,276
200,0	235,13	1,3167	3022,1	6,932	0,987	1,277
220,0	252,87	1,3468	4041,8	6,904	0,988	1,277
240,0	269,88	1,3766	3061,3	6,879	0,988	1,278
260,0	286,23	1,4062	3080,7	6,855	0,989	1,279
280,0	301,96	1,4355	3100,0	6,834	0,990	1,279
300,0	317,11	1,4645	3119,3	6,814	0,991	1,280

$T=2500$ K

0,1	0,14	1,0001	3138,1	9,246	0,988	1,276
1,0	1,39	1,0015	3139,1	8,585	0,988	1,276
5,0	6,91	1,0075	3143,2	8,123	0,989	1,276
10,0	13,73	1,0149	3148,4	7,924	0,989	1,276
20,0	27,06	1,0298	3158,8	7,725	0,989	1,277
30,0	40,01	1,0446	3169,2	7,608	0,990	1,277
40,0	52,61	1,0594	3179,5	7,525	0,990	1,278

Воздух

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
50,0	64,86	1,0740	3189,9	7,461	0,991	1,279
60,0	76,79	1,0887	3200,2	7,409	0,991	1,279
70,0	88,40	1,1032	3210,5	7,364	0,991	1,280
80,0	99,73	1,1177	3220,7	7,326	0,992	1,280
90,0	110,76	1,1321	3231,0	7,292	0,992	1,281
100,0	121,53	1,1464	3241,2	7,262	0,992	1,281
120,0	142,31	1,1749	3261,5	7,209	0,993	1,282
140,0	162,13	1,2031	3281,8	7,165	0,994	1,283
160,0	181,09	1,2310	3301,9	7,126	0,995	1,283
180,0	199,24	1,2587	3321,9	7,092	0,995	1,284
200,0	216,66	1,2861	3341,9	7,061	0,996	1,285
220,0	233,39	1,3133	3361,7	7,034	0,996	1,285
240,0	249,48	1,3403	3381,4	7,008	0,997	1,286
260,0	264,98	1,3670	3401,0	6,985	0,998	1,286
280,0	279,94	1,3935	3420,4	6,964	0,993	1,287
300,0	294,38	1,4198	3439,8	6,944	0,999	1,287

Таблица 3.15. Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	-----	-----	-------------------	--------	-----------	----

$T=500\text{ K}$

0,1	446,4	1,39	1,000	269,6	38,8	0,715
1,0	448,5	1,40	1,003	270,4	39,0	0,716
2,0	451,0	1,41	1,006	271,2	39,2	0,718
3,0	453,4	1,42	1,009	272,1	39,5	0,719
4,0	456,0	1,43	1,011	273,1	39,7	0,721
5,0	458,6	1,44	1,013	274,0	39,9	0,722
6,0	461,2	1,45	1,015	275,0	40,2	0,723
8,0	466,7	1,47	1,016	277,1	40,6	0,726
10,0	472,3	1,50	1,017	279,3	41,1	0,728
12,0	478,2	1,52	1,016	281,7	41,6	0,730
16,0	490,3	1,57	1,011	286,6	42,6	0,734
20,0	503,0	1,62	1,003	291,9	43,6	0,738
25,0	519,5	1,68	0,988	298,9	44,9	0,741
30,0	536,4	1,75	0,969	306,1	46,3	0,744
35,0	553,7	1,82	0,948	313,5	47,6	0,747
40,0	571,2	1,88	0,926	321,1	48,9	0,749
45,0	588,7	1,95	0,904	328,6	50,2	0,751
50,0	606,3	2,02	0,881	336,2	51,4	0,753
60,0	641,0	2,14	0,838	351,2	53,9	0,756

$T=600\text{ K}$

0,1	487,0	1,38	1,000	305,7	44,8	0,717
1,0	489,2	1,38	1,001	306,3	45,0	0,718
2,0	491,7	1,39	1,001	306,9	45,2	0,718
3,0	494,2	1,40	1,001	307,6	45,4	0,719
4,0	496,7	1,41	1,001	308,3	45,6	0,719
5,0	499,2	1,42	1,001	309,0	45,8	0,720
6,0	501,8	1,43	1,001	309,8	45,9	0,721

Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
8,0	507,0	1,45	0,999	311,4	46,3	0,722
10,0	512,4	1,46	0,997	313,0	46,7	0,723
12,0	517,8	1,48	0,995	314,8	47,1	0,724
16,0	529,0	1,52	0,988	318,5	48,0	0,726
20,0	540,4	1,56	0,978	322,5	48,8	0,727
25,0	555,1	1,61	0,965	327,7	49,9	0,729
30,0	570,1	1,66	0,949	333,2	51,0	0,731
35,0	585,2	1,71	0,932	339,0	52,1	0,732
40,0	600,5	1,76	0,915	344,8	53,1	0,733
45,0	615,9	1,81	0,896	350,8	54,2	0,734
50,0	631,2	1,86	0,878	356,8	55,3	0,735
60,0	661,7	1,96	0,843	369,0	57,4	0,737
70,0	691,8	2,05	0,809	381,1	59,4	0,739

$T=700$ K

0,1	523,9	1,36	1,000	339,3	50,8	0,718
1,0	526,0	1,37	0,999	339,7	51,0	0,718
2,0	528,4	1,38	0,998	340,2	51,1	0,719
3,0	530,8	1,39	0,997	340,8	51,3	0,719
4,0	533,3	1,39	0,996	341,3	51,4	0,719
5,0	535,7	1,40	0,995	341,9	51,6	0,719
6,0	538,2	1,41	0,994	342,5	51,8	0,719
8,0	543,2	1,42	0,991	343,7	52,1	0,720
10,0	548,3	1,44	0,988	345,0	52,5	0,720
12,0	553,4	1,45	0,984	346,3	52,8	0,721
16,0	563,8	1,49	0,976	349,2	53,5	0,721
20,0	574,4	1,52	0,966	352,3	54,2	0,722
25,0	587,9	1,56	0,953	356,4	55,2	0,723
30,0	601,5	1,60	0,939	360,8	56,1	0,723
35,0	615,2	1,64	0,924	365,3	57,0	0,724
40,0	629,0	1,68	0,909	370,0	57,9	0,724
45,0	642,8	1,72	0,893	374,3	58,9	0,725
50,0	656,6	1,76	0,878	379,7	59,8	0,726
60,0	684,2	1,84	0,847	389,7	61,6	0,727
70,0	711,4	1,91	0,818	399,8	63,4	0,728
80,0	738,3	1,99	0,789	410,0	65,1	0,729
90,0	764,7	2,06	0,763	420,1	66,9	0,731

$T=800$ K

0,1	557,8	1,35	1,000	371,0	56,7	0,719
1,0	559,9	1,36	0,999	371,3	56,9	0,719
2,0	562,2	1,37	0,997	371,7	57,0	0,719
3,0	564,6	1,37	0,995	372,1	57,2	0,719
4,0	567,0	1,38	0,994	372,5	57,3	0,719
5,0	569,3	1,39	0,992	373,0	57,5	0,719
6,0	571,7	1,39	0,990	373,4	57,6	0,719
8,0	576,5	1,41	0,987	374,4	57,9	0,719
10,0	581,3	1,42	0,983	375,4	58,2	0,719
12,0	586,2	1,43	0,978	376,5	58,5	0,718
16,0	596,0	1,46	0,970	378,8	59,1	0,718
20,0	605,9	1,49	0,960	381,2	59,8	0,718
25,0	618,4	1,52	0,947	384,5	60,6	0,718
30,0	631,0	1,55	0,934	388,0	61,4	0,719

Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
35,0	643,7	1,59	0,921	391,7	62,2	0,719
40,0	656,4	1,62	0,907	395,5	63,0	0,719
45,0	669,1	1,65	0,893	399,4	63,8	0,719
50,0	681,8	1,69	0,879	403,5	64,6	0,719
60,0	707,1	1,75	0,852	411,3	66,2	0,720
70,0	732,2	1,82	0,826	420,4	67,8	0,720
80,0	757,0	1,88	0,800	429,1	69,4	0,721
90,0	781,4	1,94	0,776	437,8	70,9	0,722
100,0	805,4	2,00	0,754	446,5	72,4	0,723

$T=900$ K

0,1	589,6	1,34	1,000	401,1	62,6	0,718
1,0	591,6	1,35	0,998	401,3	62,7	0,718
2,0	593,9	1,36	0,996	401,6	62,8	0,718
3,0	596,1	1,36	0,994	402,0	63,0	0,718
4,0	598,4	1,37	0,992	402,3	63,1	0,718
5,0	600,7	1,37	0,990	402,6	63,2	0,718
6,0	603,0	1,38	0,988	403,0	63,4	0,718
8,0	607,6	1,39	0,984	403,8	63,6	0,717
10,0	612,2	1,40	0,980	404,6	63,9	0,717
12,0	616,8	1,41	0,976	405,4	64,2	0,717
16,0	626,1	1,44	0,967	407,2	64,7	0,716
20,0	635,5	1,46	0,957	409,2	65,3	0,716
25,0	647,3	1,49	0,945	411,9	66,0	0,716
30,0	659,1	1,52	0,933	414,7	66,7	0,715
35,0	671,0	1,55	0,920	417,8	67,4	0,715
40,0	682,8	1,58	0,907	420,9	68,2	0,715
45,0	694,7	1,60	0,895	424,2	68,9	0,714
50,0	706,5	1,63	0,882	427,6	69,6	0,714
60,0	730,1	1,69	0,857	434,6	71,0	0,714
70,0	753,5	1,74	0,833	441,9	72,5	0,714
80,0	776,6	1,80	0,810	449,3	73,9	0,715
90,0	799,4	1,85	0,788	456,9	75,3	0,715
100,0	821,8	1,90	0,767	464,6	76,7	0,716

$T=1000$ K

0,1	619,6	1,34	1,000	429,9	68,3	0,718
1,0	621,6	1,34	0,998	430,1	68,4	0,718
5,0	630,3	1,36	0,990	431,1	68,9	0,717
10,0	641,3	1,39	0,979	432,6	69,5	0,716
20,0	663,6	1,44	0,956	436,4	70,7	0,714
30,0	685,9	1,49	0,933	440,9	72,0	0,713
40,0	708,3	1,54	0,909	446,0	73,3	0,712
50,0	730,6	1,59	0,885	451,6	74,6	0,711
60,0	752,8	1,64	0,862	457,6	76,0	0,710
70,0	774,8	1,69	0,840	463,8	77,3	0,710
80,0	796,6	1,74	0,819	470,3	78,5	0,710
90,0	818,1	1,78	0,798	476,9	79,8	0,710
100,0	839,3	1,83	0,779	483,6	81,1	0,710
120,0	880,8	1,92	0,742	497,2	83,6	0,711

$T=1100$ K

0,1	648,2	1,33	1,000	457,6	73,9	0,718
-----	-------	------	-------	-------	------	-------

Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
1,0	650,1	1,33	0,998	457,7	74,0	0,718
5,0	658,5	1,35	0,989	458,5	74,4	0,716
10,0	669,1	1,38	0,978	459,8	75,0	0,715
20,0	690,4	1,42	0,956	462,8	76,1	0,713
30,0	711,7	1,47	0,933	466,5	77,3	0,711
40,0	733,0	1,51	0,911	470,8	78,5	0,709
50,0	754,2	1,56	0,889	475,5	79,7	0,708
60,0	775,2	1,60	0,867	480,6	80,9	0,707
70,0	796,1	1,65	0,847	486,0	82,1	0,706
80,0	816,7	1,69	0,827	491,6	83,2	0,706
90,0	837,1	1,73	0,807	497,4	84,4	0,706
100,0	857,3	1,77	0,789	503,3	85,6	0,706
120,0	896,8	1,85	0,755	515,3	87,9	0,706
140,0	935,2	1,92	0,724	527,6	90,1	0,707

$T=1200\text{ K}$

0,1	675,5	1,32	1,000	484,3	79,3	0,717
1,0	677,3	1,33	0,998	484,4	79,4	0,717
5,0	685,5	1,34	0,989	485,1	79,8	0,716
10,0	695,7	1,37	0,978	486,0	80,3	0,714
20,0	716,1	1,41	0,957	488,5	81,3	0,712
30,0	736,5	1,45	0,935	491,6	82,4	0,710
40,0	756,9	1,49	0,914	495,2	83,5	0,708
50,0	777,1	1,53	0,893	499,2	84,6	0,706
60,0	797,2	1,57	0,873	503,5	85,7	0,705
70,0	817,1	1,61	0,853	508,2	86,8	0,704
80,0	836,8	1,65	0,834	513,1	87,9	0,703
90,0	856,3	1,69	0,816	518,1	89,0	0,703
100,0	875,5	1,72	0,799	523,3	90,1	0,702
120,0	913,3	1,80	0,766	534,1	92,3	0,702
140,0	950,1	1,86	0,736	545,1	94,3	0,702
160,0	985,9	1,93	0,709	556,3	96,4	0,703

$T=1300\text{ K}$

0,1	701,7	1,32	1,000	510,2	84,5	0,717
1,0	703,5	1,32	0,998	510,3	84,6	0,717
5,0	711,4	1,34	0,989	510,8	85,0	0,715
10,0	721,2	1,36	0,979	511,6	85,5	0,714
20,0	740,9	1,40	0,958	513,6	86,5	0,711
30,0	760,6	1,43	0,937	516,1	87,5	0,709
40,0	780,1	1,47	0,917	519,1	88,5	0,706
50,0	799,5	1,51	0,897	522,5	89,5	0,705
60,0	818,7	1,54	0,878	526,3	90,5	0,703
70,0	837,8	1,53	0,859	530,3	91,6	0,702
80,0	856,7	1,62	0,841	534,6	92,6	0,701
90,0	875,4	1,65	0,824	539,0	93,6	0,700
100,0	893,8	1,68	0,807	543,6	94,6	0,700
120,0	930,1	1,75	0,776	553,2	96,6	0,699
140,0	965,5	1,81	0,748	563,2	98,6	0,699
160,0	1000,0	1,87	0,722	573,3	100,5	0,699

$T=1400\text{ K}$

0,1	727,0	1,31	1,000	535,4	89,7	0,717
-----	-------	------	-------	-------	------	-------

Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
1,0	728,7	1,32	0,998	535,5	89,7	0,717
5,0	736,4	1,33	0,990	535,8	90,1	0,715
10,0	745,9	1,35	0,979	536,4	90,5	0,714
20,0	764,9	1,39	0,959	538,0	91,5	0,711
30,0	783,8	1,42	0,939	540,1	92,4	0,708
40,0	802,6	1,45	0,919	542,7	93,3	0,706
50,0	821,3	1,49	0,901	545,6	94,3	0,704
60,0	839,8	1,52	0,882	548,8	95,2	0,702
70,0	858,2	1,56	0,865	552,3	96,2	0,701
80,0	876,4	1,59	0,848	556,1	97,2	0,699
90,0	894,3	1,62	0,831	560,0	98,1	0,698
100,0	912,1	1,65	0,816	564,1	99,1	0,698
120,0	947,1	1,71	0,786	572,6	101,0	0,697
140,0	981,2	1,77	0,759	581,6	102,8	0,696
160,0	1014,5	1,83	0,734	590,8	104,7	0,696
180,0	1047,1	1,88	0,710	600,2	106,5	0,696

$T=1500$ K

0,1	751,5	1,31	1,000	559,9	94,6	0,717
1,0	753,1	1,31	0,998	560,0	94,7	0,716
5,0	760,5	1,33	0,990	560,2	95,1	0,715
10,0	769,8	1,34	0,980	560,7	95,5	0,713
20,0	788,2	1,38	0,960	561,9	96,3	0,710
30,0	806,4	1,41	0,941	563,7	97,2	0,708
40,0	824,6	1,44	0,922	565,3	98,1	0,705
50,0	842,6	1,47	0,904	568,3	99,0	0,703
60,0	860,5	1,50	0,887	571,1	99,9	0,701
70,0	878,2	1,53	0,870	574,1	100,8	0,700
80,0	895,8	1,56	0,854	577,4	101,4	0,698
90,0	913,1	1,59	0,838	580,9	102,6	0,697
100,0	930,3	1,62	0,823	584,5	103,5	0,696
120,0	964,1	1,68	0,795	592,2	105,3	0,695
140,0	997,1	1,74	0,769	600,3	107,0	0,694
160,0	1029,4	1,79	0,744	608,7	108,8	0,693
180,0	1061,0	1,84	0,722	617,3	110,5	0,693
200,0	1091,8	1,89	0,701	626,1	112,2	0,693

$T=1750$ K

0,1	809,4	1,30	1,000	618,7	106,6	0,716
1,0	810,9	1,31	0,998	618,7	106,6	0,716
5,0	817,8	1,32	0,991	618,8	106,9	0,715
10,0	826,4	1,33	0,981	618,9	107,3	0,713
20,0	843,5	1,36	0,964	619,6	108,0	0,710
30,0	860,4	1,39	0,946	620,6	108,3	0,707
40,0	877,2	1,41	0,929	622,0	109,5	0,705
50,0	893,9	1,44	0,913	623,7	110,3	0,703
60,0	910,5	1,47	0,897	625,6	111,1	0,701
70,0	926,8	1,49	0,882	627,8	111,9	0,699
80,0	943,1	1,52	0,867	630,2	112,7	0,697
90,0	959,2	1,54	0,853	632,7	113,5	0,696
100,0	975,1	1,57	0,840	635,5	114,2	0,695
120,0	1006,4	1,62	0,814	641,3	115,8	0,692
140,0	1037,1	1,67	0,790	647,6	117,4	0,691

Воздух

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
160,0	1067,2	1,71	0,768	654,3	118,9	0,690
180,0	1096,7	1,75	0,747	661,2	120,5	0,689
200,0	1125,5	1,80	0,727	668,4	122,0	0,688
220,0	1153,8	1,84	0,709	675,7	123,5	0,688

$T=2000\text{ K}$

0,1	863,4	1,30	1,000	674,5	117,8	0,716
1,0	864,9	1,30	0,998	674,4	117,8	0,716
5,0	871,3	1,31	0,991	674,4	118,1	0,715
10,0	879,4	1,32	0,983	674,4	118,4	0,713
20,0	895,4	1,35	0,967	674,6	119,1	0,710
30,0	911,2	1,37	0,951	675,2	119,7	0,708
40,0	927,0	1,39	0,935	676,0	120,4	0,705
50,0	942,6	1,42	0,921	677,1	121,1	0,703
60,0	958,1	1,44	0,906	678,5	121,8	0,701
70,0	973,4	1,46	0,893	680,0	122,5	0,699
80,0	988,6	1,49	0,879	681,7	123,2	0,697
90,0	1003,7	1,51	0,866	683,6	123,9	0,696
100,0	1018,6	1,53	0,854	685,7	124,6	0,694
120,0	1048,0	1,57	0,830	690,2	126,0	0,692
140,0	1076,9	1,61	0,808	695,1	127,4	0,690
160,0	1105,2	1,65	0,787	700,5	128,8	0,688
180,0	1132,9	1,69	0,768	706,1	130,2	0,687
200,0	1160,2	1,73	0,750	711,9	131,5	0,686
220,0	1186,9	1,77	0,733	718,0	132,9	0,685
240,0	1213,1	1,80	0,716	724,2	134,2	0,685
260,0	1238,9	1,84	0,701	730,5	135,6	0,684

$T=2250\text{ K}$

0,1	914,3	1,29	1,000	727,7	128,4	0,717
1,0	915,7	1,30	0,998	727,7	128,5	0,716
5,0	921,8	1,30	0,992	727,5	128,7	0,715
10,0	929,4	1,32	0,984	727,4	129,0	0,714
20,0	944,4	1,34	0,969	727,4	129,6	0,711
30,0	959,4	1,36	0,955	727,6	130,2	0,708
40,0	974,3	1,38	0,941	728,0	130,8	0,706
50,0	989,0	1,40	0,927	728,7	131,4	0,704
60,0	1003,6	1,42	0,914	729,6	132,0	0,702
70,0	1018,1	1,44	0,901	730,7	132,6	0,700
80,0	1032,4	1,46	0,889	732,0	133,3	0,698
90,0	1046,6	1,48	0,877	733,4	133,9	0,696
100,0	1060,7	1,50	0,866	734,9	134,5	0,695
120,0	1088,6	1,54	0,844	738,4	135,8	0,692
140,0	1115,9	1,57	0,823	742,3	137,1	0,690
160,0	1142,7	1,61	0,804	746,6	138,3	0,688
180,0	1169,1	1,64	0,786	751,1	139,6	0,687
200,0	1195,0	1,68	0,769	756,0	140,9	0,686
220,0	1220,5	1,71	0,752	761,0	142,1	0,684
240,0	1245,5	1,74	0,737	766,2	143,3	0,683
260,0	1270,0	1,78	0,723	771,6	144,6	0,683
280,0	1294,2	1,81	0,709	777,1	145,8	0,682
300,0	1318,0	1,84	0,696	782,7	147,0	0,682

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=2500\text{ K}$						
0,1	962,6	1,29	1,000	778,9	138,6	0,717
1,0	963,9	1,29	0,999	778,8	138,6	0,717
5,0	969,6	1,30	0,993	778,6	138,8	0,716
10,0	976,8	1,31	0,986	778,4	139,1	0,714
20,0	991,1	1,33	0,972	778,1	139,6	0,712
30,0	1005,3	1,35	0,959	778,1	140,2	0,709
40,0	1019,4	1,37	0,946	778,3	140,7	0,707
50,0	1033,4	1,39	0,933	778,7	141,3	0,705
60,0	1047,3	1,40	0,921	779,3	141,8	0,703
70,0	1061,0	1,42	0,909	780,0	142,4	0,701
80,0	1074,6	1,44	0,898	780,9	143,0	0,699
90,0	1088,2	1,46	0,887	782,0	143,6	0,698
100,0	1101,6	1,47	0,876	783,1	144,1	0,696
120,0	1128,1	1,51	0,856	785,8	145,3	0,693
140,0	1154,1	1,54	0,836	788,9	146,5	0,691
160,0	1179,7	1,58	0,818	792,3	147,6	0,689
180,0	1204,9	1,61	0,801	796,0	148,8	0,687
200,0	1229,6	1,64	0,785	800,0	149,9	0,685
220,0	1254,0	1,67	0,770	804,2	151,1	0,684
240,0	1277,0	1,70	0,755	808,6	152,2	0,683
260,0	1301,5	1,73	0,741	813,2	153,4	0,682
280,0	1324,7	1,75	0,728	817,8	154,5	0,681
300,0	1347,6	1,78	0,716	822,7	155,6	0,681

3.6. Оксид азота

Оксид азота относится к числу мало исследованных веществ. Известны две работы о сжимаемости оксида азота. В 1925 г. опубликована работа Бринера с соавторами [127], в которой сжимаемость оксида азота измерена при температуре от 194 до 281 К и давлении от 3 до 16 МПа.

Голдинг и Сейдж [128] измерили сжимаемость оксида азота методом переменного объема в интервале температур 40—220 °F (22—377 К) и давлений 0—17,2 МПа. Получены четыре изотермы: 40, 100, 160 и 220 °F.

Единицей измерения давления служит фунт/дюйм², удельного объема фут³/фунт. Для пересчета данных использованы следующие соотношения: 1 фунт/дюйм² = $68,9 \cdot 10^{-4}$ МПа; 1 фут³/фунт = 0,0624 м³/кг.

$T = (5/9)f + 255,37$, где T и f — соответственно температура в К и °F.

В работе большое внимание уделено чистоте исследуемого вещества, проведены две серии измерений, которые хорошо согласуются между собой, что говорит о надежности экспериментальных данных.

Данные работы [127] плохо согласуются с данными Голдинга и Сейджа [128]. Кроме того, они получены в области плотностей, близких к критической. Поэтому для обработки приняты только данные работы [128].

На рис. 3.8 показана область параметров состояния, в которой для получения уравнения состояния использовались экспериментальные данные о сжимаемости оксида азота. Обработано 46 экспериментальных точек. Средне-квадратическое отклонение расчетных значений сжимаемости от экспериментальных составляет 0,09%.

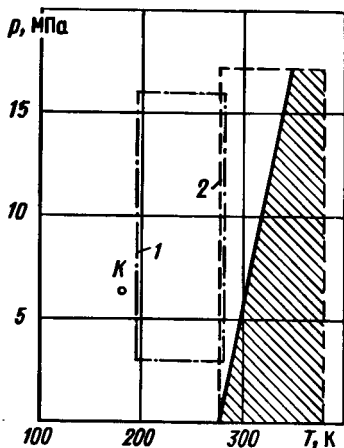


Рис. 3.8. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости оксида азота в газообразном состоянии:
1 — [127]; 2 — [128]

Уравнение состояния оксида азота получено в виде вириального уравнения (1.3) с пятью вириальными коэффициентами при использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6).

Совместная обработка данных о сжимаемости и свойствах переноса оксида азота не производилась. Для расчета таблиц теплофизических свойств использованы приведенные выше константы уравнения состояния.

Коэффициент динамической вязкости при атмосферном давлении рассчитан по уравнению Энскога (1.24), в котором использована аппроксимация, приведенная в § 2.1.

Вязкость при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению с тремя членами ряда (1.25). Константы аппроксимации комплексов $B_{\eta}^* f_{\eta} / \Omega^{(2,2)*}$ и $C_{\eta}^* f_{\eta} / \Omega^{(2,2)*}$ использованы те же, что и в § 2.1.

Теплопроводность при атмосферном давлении рассчитана по уравнению Мейсона и Мончика (1.27). Функция $\beta_0(T^*)$ для оксида азота рассчитана и

аппроксимирована полиномом $\beta_0(T^*) = \sum_{i=1}^6 m_i \varepsilon / (kT)^{s_i}$.

• Теплопроводность оксида азота при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению вида (1.25), в котором

$$\frac{B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}}{\Omega^{(2,2)*}} = \sum_{j=1}^6 p_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{s_j}; \quad \frac{C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}}{\Omega^{(2,2)*}} = \sum_{j=1}^6 q_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{t_j}.$$

Значения коэффициентов аппроксимации и соответствующих им степеней аргументов для $C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)} / \Omega^{(2,2)*}$ использованы те же, что и в § 2.1. Значения B_{λ}^* для оксида азота рассчитаны по методике, разработанной в [22], и комплексы $B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)} / \Omega^{(2,2)*}$ аппроксимированы полиномом.

Таблицы теплофизических свойств оксида азота рассчитаны в интервале 500—2000 К. Максимальное давление на изотермах определяется при $p_{\text{макс}} = 400 \text{ кг/м}^3$.

Для расчета калорических функций получены выражения, описывающие значения этих функций для оксида азота в идеально-газовом состоянии.

В справочнике под редакцией акад. Глушко [42] содержатся таблицы энтальпии и энтропии оксида азота в идеально-газовом состоянии в интервале температур $T = 293,15 \div 5000 \text{ К}$. В работе Опфеля с сотрудниками [129] приводятся данные об энтальпии и энтропии в интервале $T = 210 \div 377 \text{ К}$. Данные [42 и 129] хорошо согласуются между собой. В результате совместной аппроксимации в интервале $T = 210 \div 3000 \text{ К}$ получены полиномы вида (3.2), аппроксимирующие энтальпию и энтропию. Погрешность аппроксимации энтальпии $\delta h = 0,01\%$, энтропии $\delta s = 0,02\%$.

При пересчете данных [129] в стандартные тепловые единицы использованы следующие соотношения:

$$1 \text{ БЕТ}/(\text{фунт} \cdot ^\circ\text{Ra}) = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad 1 \text{ БЕТ}/\text{фунт} = 2325,84 \text{ Дж}/\text{кг}.$$

Полином для расчета теплоемкости получен дифференцированием выражения для энтальпии по температуре.

За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. В выражение для энтальпии введена поправка на теплоту сублимации. Значение теплоты сублимации для оксида азота приведено в [36]:

$$\Delta h_0^0 = 15,459 \text{ кДж/моль.}$$

Приводим коэффициенты аппроксимирующих полиномов для энтальпии, теплоемкости и энтропии оксида азота в идеальном-газовом состоянии:

$$\begin{array}{lll} \alpha_0 = 4,57593798 \cdot 10^0 & \beta_0 = 4,57593798 \cdot 10^0 & \gamma_0 = 4,10470271 \cdot 10^1 \\ \alpha_1 = 3,26372092 \cdot 10^{-1} & \beta_1 = 0 & \gamma_1 = -2,80154442 \cdot 10^1 \\ \alpha_2 = 1,02790930 \cdot 10^0 & \beta_2 = -1,02790930 \cdot 10^0 & \gamma_2 = 3,37004543 \cdot 10^1 \\ \alpha_3 = -3,57544854 \cdot 10^{-1} & \beta_3 = 7,15089708 \cdot 10^{-1} & \gamma_3 = -2,69538469 \cdot 10^1 \\ \alpha_4 = 6,97392956 \cdot 10^{-2} & \beta_4 = -2,09217887 \cdot 10^{-1} & \gamma_4 = 1,37098843 \cdot 10^1 \\ \alpha_5 = -7,25139711 \cdot 10^{-3} & \beta_5 = 2,90555884 \cdot 10^{-2} & \gamma_5 = -4,36932313 \cdot 10^0 \\ \alpha_6 = 3,13567598 \cdot 10^{-4} & \beta_6 = -1,56783799 \cdot 10^{-3} & \gamma_6 = -8,41683572 \cdot 10^{-1} \\ & & \gamma_7 = -8,93643585 \cdot 10^{-2} \\ & & \gamma_8 = 4,00755720 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

При расчете таблиц использованы следующие значения физических констант для оксида азота:

масса моля $\mu = 30,008 \text{ г/моль}$;

газовая постоянная $R = 277,07 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = 128,803593 \text{ К}$;

$$b_0 = 1,77099487 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Константы полиномов, аппроксимирующих приведенные вириальные коэффициенты B^* , D^* и E^* , те же, что и в § 2.1. Для расчета использован аддитивный третий вириальный коэффициент. Значения коэффициентов полинома $C^* = \sum_{i=0}^8 c_i \tau^i$, работающего в интервале $T^* = 2 \div 10$:

$$\begin{array}{ll} c_0 = 1,42487354 \cdot 10^{-1} & c_4 = -5,55654840 \cdot 10^2 \\ c_1 = 3,21042713 \cdot 10^0 & c_5 = 1,20306696 \cdot 10^3 \\ c_2 = -2,95153573 \cdot 10^1 & c_6 = -1,58908640 \cdot 10^3 \\ c_3 = 1,62847488 \cdot 10^2 & c_7 = 1,16303559 \cdot 10^3 \\ & c_8 = -3,61460796 \cdot 10^2 \end{array}$$

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для β_0 и $B_\lambda f_\lambda^{(3)}/\Omega^{(2,2)}$ оксида азота и степени аргументов в них приводятся ниже:

$$\begin{array}{llll} m_1 = 1,13750 \cdot 10^2 & s_1 = 5 & p_1 = -7,68788 \cdot 10^0 & s_1 = 2,5 \\ m_2 = -1,62680 \cdot 10^2 & s_2 = 4 & p_2 = 1,04339 \cdot 10^1 & s_2 = 2,0 \\ m_3 = 8,28650 \cdot 10^1 & s_3 = 3 & p_3 = -6,68657 \cdot 10^0 & s_3 = 1,0 \\ m_4 = -1,48850 \cdot 10^1 & s_4 = 2 & p_4 = 4,88494 \cdot 10^0 & s_4 = 0,5 \\ m_5 = -8,18910 \cdot 10^{-1} & s_5 = 1 & p_5 = -6,99584 \cdot 10^{-1} & s_5 = 0 \\ m_6 = 1,74940 \cdot 10^0 & s_6 = 0 & p_6 = 5,71655 \cdot 10^{-2} & s_6 = -0,5 \end{array}$$

Результаты расчета теплофизических свойств оксида азота приведены в табл. 3.16 и 3.17.

Таблица 3.16. Оксид азота

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 500 \text{ К}$						
0,1	0,72	1,0001	1022,8	7,535	0,739	1,016
1,0	7,21	1,0013	1021,9	6,895	0,739	1,021
2,0	14,40	1,0027	1020,8	6,700	0,740	1,027
3,0	21,57	1,0041	1019,8	6,585	0,741	1,032

Оксид азота

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
4,0	28,71	1,0057	1018,9	6,503	0,741	1,038
5,0	35,83	1,0074	1017,9	6,439	0,742	1,043
6,0	42,92	1,0092	1017,0	6,386	0,743	1,049
8,0	57,00	1,0132	1015,1	6,302	0,744	1,059
10,0	70,95	1,0175	1013,4	6,236	0,746	1,070
12,0	84,74	1,0223	1011,8	6,181	0,747	1,080
16,0	111,82	1,0331	1008,7	6,093	0,750	1,099
20,0	138,14	1,0455	1006,1	6,023	0,752	1,116
25,0	169,85	1,0630	1003,3	5,953	0,755	1,136
30,0	200,16	1,0826	1001,0	5,894	0,758	1,153
35,0	229,01	1,1041	999,2	5,844	0,761	1,168
40,0	256,41	1,1272	997,9	5,800	0,764	1,181
45,0	282,39	1,1517	997,1	5,761	0,766	1,192
50,0	306,98	1,1774	996,6	5,726	0,769	1,202
60,0	352,35	1,2315	996,8	5,665	0,774	1,218
70,0	393,12	1,2882	998,0	5,614	0,779	1,230

T = 600 K

0,1	0,60	1,0002	1125,6	7,724	0,764	1,041
1,0	6,00	1,0022	1125,1	7,084	0,764	1,044
2,0	11,98	1,0046	1124,5	6,891	0,765	1,048
3,0	17,92	1,0069	1124,0	6,777	0,765	1,052
4,0	23,84	1,0094	1123,4	6,695	0,766	1,055
5,0	29,72	1,0118	1122,9	6,632	0,766	1,059
6,0	35,58	1,0144	1122,4	6,580	0,767	1,062
8,0	47,19	1,0197	1121,4	6,497	0,768	1,069
10,0	58,67	1,0252	1120,5	6,433	0,769	1,076
12,0	70,02	1,0310	1119,7	6,379	0,770	1,082
16,0	92,26	1,0432	1118,2	6,294	0,771	1,095
20,0	113,90	1,0562	1117,0	6,227	0,773	1,106
25,0	140,07	1,0736	1115,7	6,159	0,775	1,119
30,0	165,23	1,0922	1114,9	6,103	0,778	1,131
35,0	189,37	1,1118	1114,4	6,055	0,780	1,141
40,0	212,50	1,1323	1114,2	6,014	0,782	1,151
45,0	234,65	1,1536	1114,3	5,976	0,784	1,159
50,0	255,85	1,1756	1114,7	5,943	0,786	1,166
60,0	295,54	1,2212	1116,2	5,885	0,790	1,179
70,0	331,90	1,2687	1118,6	5,836	0,793	1,189
80,0	365,31	1,3173	1121,7	5,793	0,797	1,197
90,0	396,09	1,3668	1125,3	5,756	0,801	1,205

T = 700 K

0,1	0,52	1,0003	1231,1	7,889	0,790	1,067
1,0	5,14	1,0026	1230,8	7,250	0,790	1,070
2,0	10,26	1,0053	1230,6	7,057	0,791	1,072
3,0	15,35	1,0079	1230,3	6,944	0,791	1,075
4,0	20,41	1,0107	1230,1	6,863	0,791	1,077
5,0	25,44	1,0134	1229,8	6,800	0,792	1,080
6,0	30,44	1,0162	1229,6	6,748	0,792	1,082
8,0	40,36	1,0219	1229,2	6,667	0,793	1,087
10,0	50,17	1,0278	1228,9	6,603	0,794	1,092
12,0	59,85	1,0338	1228,6	6,550	0,795	1,096
16,0	78,86	1,0461	1228,1	6,467	0,796	1,105
20,0	97,37	1,0590	1227,8	6,401	0,797	1,113

Оксид азота

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
25,0	119,82	1,0758	1227,7	6,335	0,799	1,123
30,0	141,49	1,0932	1227,9	6,281	0,801	1,131
35,0	162,39	1,1112	1228,3	6,234	0,803	1,139
40,0	182,54	1,1298	1228,9	6,194	0,804	1,146
45,0	201,95	1,1489	1229,8	6,158	0,806	1,153
50,0	220,64	1,1684	1230,8	6,125	0,808	1,159
60,0	255,99	1,2085	1233,5	6,069	0,811	1,169
70,0	288,79	1,2497	1236,8	6,021	0,814	1,177
80,0	319,30	1,2918	1240,6	5,980	0,817	1,185
90,0	347,72	1,3345	1244,9	5,943	0,820	1,191
100,0	374,26	1,3776	1249,6	5,910	0,823	1,196

T = 800 K

0,1	0,45	1,0003	1339,0	8,035	0,814	1,091
1,0	4,50	1,0027	1339,0	7,396	0,814	1,093
2,0	8,97	1,0054	1338,9	7,203	0,815	1,095
3,0	13,42	1,0082	1338,9	7,090	0,815	1,097
4,0	17,85	1,0110	1338,9	7,010	0,815	1,099
5,0	22,25	1,0138	1338,9	6,947	0,816	1,101
6,0	26,63	1,0166	1338,9	6,896	0,816	1,103
8,0	35,30	1,0224	1338,9	6,814	0,817	1,106
10,0	43,88	1,0282	1338,9	6,751	0,817	1,110
12,0	52,35	1,0341	1339,0	6,699	0,818	1,113
16,0	69,00	1,0461	1339,3	6,617	0,819	1,120
20,0	85,24	1,0585	1339,8	6,552	0,821	1,126
25,0	104,98	1,0744	1340,5	6,487	0,822	1,133
30,0	124,09	1,0907	1341,4	6,434	0,824	1,140
35,0	142,59	1,1074	1342,5	6,388	0,825	1,146
40,0	160,49	1,1244	1343,8	6,348	0,827	1,151
45,0	177,81	1,1418	1345,2	6,313	0,828	1,157
50,0	194,56	1,1594	1346,8	6,282	0,829	1,161
60,0	226,46	1,1953	1350,4	6,227	0,832	1,170
70,0	256,33	1,2320	1354,4	6,180	0,835	1,177
80,0	284,35	1,2693	1359,0	6,139	0,838	1,183
90,0	310,67	1,3070	1363,8	6,103	0,840	1,189
100,0	335,44	1,3449	1369,0	6,071	0,843	1,194
120,0	380,88	1,4214	1380,1	6,015	0,848	1,202

T = 900 K

0,1	0,40	1,0003	1449,2	8,164	0,835	1,113
1,0	4,00	1,0027	1449,4	7,526	0,836	1,114
2,0	7,98	1,0054	1449,5	7,333	0,836	1,115
3,0	11,93	1,0081	1449,6	7,220	0,836	1,117
4,0	15,87	1,0109	1449,8	7,140	0,837	1,118
5,0	19,78	1,0136	1449,9	7,077	0,837	1,120
6,0	23,67	1,0164	1450,1	7,026	0,837	1,121
8,0	31,39	1,0220	1450,4	6,945	0,838	1,124
10,0	39,02	1,0276	1450,8	6,882	0,838	1,127
12,0	46,57	1,0333	1451,2	6,831	0,839	1,129
16,0	61,41	1,0449	1452,0	6,749	0,840	1,134
20,0	75,91	1,0566	1453,0	6,685	0,841	1,139
25,0	93,56	1,0716	1454,4	6,621	0,842	1,145
30,0	110,70	1,0868	1455,9	6,568	0,844	1,150
35,0	127,33	1,1023	1457,5	6,523	0,845	1,155

Оксид азота

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
40,0	143,48	1,1180	1459,3	6,484	0,846	1,160
45,0	159,14	1,1339	1461,2	6,449	0,848	1,164
50,0	174,35	1,1500	1463,2	6,418	0,849	1,168
60,0	203,45	1,1827	1467,6	6,364	0,852	1,175
70,0	230,88	1,2158	1472,4	6,318	0,854	1,181
80,0	256,78	1,2494	1477,5	6,279	0,856	1,187
90,0	281,27	1,2832	1482,8	6,243	0,859	1,192
100,0	304,45	1,3172	1488,5	6,211	0,861	1,196
120,0	347,31	1,3856	1500,4	6,157	0,866	1,204
140,0	386,10	1,4541	1513,0	6,110	0,870	1,210

$T=1000\text{ K}$

0,1	0,36	1,0003	1561,4	8,281	0,854	1,131
1,0	3,60	1,0026	1561,7	7,643	0,854	1,132
5,0	17,81	1,0132	1562,8	7,195	0,855	1,137
10,0	35,16	1,0266	1564,2	7,001	0,856	1,142
20,0	68,48	1,0541	1567,6	6,805	0,859	1,152
30,0	100,03	1,0825	1571,4	6,689	0,861	1,161
40,0	129,89	1,1115	1575,7	6,605	0,864	1,169
50,0	158,16	1,1410	1580,4	6,541	0,866	1,176
60,0	184,94	1,1709	1585,4	6,487	0,868	1,182
70,0	210,32	1,2012	1590,8	6,442	0,870	1,187
80,0	234,41	1,2318	1596,4	6,402	0,873	1,192
90,0	257,29	1,2625	1602,2	6,368	0,875	1,196
100,0	279,06	1,2934	1608,3	6,336	0,877	1,200
120,0	319,56	1,3553	1620,9	6,282	0,881	1,207
140,0	356,52	1,4173	1634,1	6,236	0,885	1,213
160,0	390,42	1,4791	1647,7	6,196	0,889	1,218

$T=1100\text{ K}$

0,1	0,33	1,0003	1675,3	8,388	0,869	1,147
1,0	3,27	1,0025	1675,7	7,750	0,870	1,147
5,0	16,20	1,0126	1677,2	7,302	0,871	1,151
10,0	32,00	1,0254	1679,1	7,109	0,872	1,156
20,0	62,41	1,0515	1683,4	6,913	0,874	1,164
30,0	91,30	1,0781	1688,1	6,798	0,876	1,171
40,0	118,76	1,1051	1693,1	6,716	0,878	1,178
50,0	144,86	1,1325	1698,4	6,651	0,880	1,183
60,0	169,68	1,1602	1704,0	6,599	0,882	1,188
70,0	193,31	1,1881	1709,8	6,554	0,884	1,193
80,0	215,83	1,2162	1715,9	6,515	0,886	1,197
90,0	237,31	1,2444	1722,1	6,480	0,888	1,201
100,0	257,82	1,2726	1728,5	6,449	0,890	1,205
120,0	296,20	1,3293	1741,8	6,396	0,894	1,211
140,0	331,45	1,3859	1755,5	6,350	0,898	1,216
160,0	363,97	1,4424	1769,6	6,311	0,901	1,221
180,0	394,12	1,4985	1784,0	6,276	0,905	1,225

$T=1200\text{ K}$

0,1	0,30	1,0002	1790,7	8,487	0,883	1,160
1,0	3,00	1,0024	1791,1	7,849	0,883	1,161
5,0	14,86	1,0120	1792,9	7,402	0,884	1,164
10,0	29,37	1,0242	1795,3	7,209	0,885	1,167
20,0	57,35	1,0489	1800,3	7,014	0,887	1,174

Оксид азота

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
30,0	84,02	1,0739	1805,6	6,899	0,889	1,180
40,0	109,45	1,0992	1811,2	6,817	0,891	1,186
50,0	133,71	1,1247	1817,1	6,753	0,893	1,190
60,0	156,86	1,1504	1823,1	6,701	0,894	1,195
70,0	178,98	1,1763	1829,4	6,657	0,896	1,199
80,0	200,13	1,2023	1835,9	6,618	0,898	1,203
90,0	220,37	1,2283	1842,5	6,584	0,900	1,206
100,0	239,76	1,2544	1849,2	6,553	0,902	1,209
120,0	276,21	1,3067	1863,1	6,500	0,905	1,214
140,0	309,88	1,3588	1877,3	6,455	0,908	1,219
160,0	341,11	1,4108	1891,8	6,416	0,912	1,223
180,0	370,18	1,4625	1906,5	6,381	0,915	1,227
200,0	397,35	1,5139	1921,5	6,350	0,918	1,231

T = 1300 K

0,1	0,28	1,0002	1907,3	8,580	0,894	1,171
1,0	2,77	1,0023	1907,7	7,942	0,894	1,172
5,0	13,72	1,0115	1909,8	7,495	0,895	1,174
10,0	27,14	1,0230	1912,6	7,302	0,896	1,177
20,0	53,07	1,0463	1918,2	7,108	0,898	1,183
30,0	77,85	1,0699	1924,0	6,993	0,900	1,188
40,0	101,54	1,0937	1930,1	6,912	0,901	1,193
50,0	124,21	1,1176	1936,4	6,848	0,903	1,197
60,0	145,92	1,1416	1942,9	6,796	0,905	1,201
70,0	166,71	1,1657	1949,6	6,752	0,906	1,204
80,0	186,66	1,1899	1956,4	6,714	0,908	1,207
90,0	205,80	1,2141	1963,3	6,680	0,910	1,210
100,0	224,19	1,2384	1970,3	6,650	0,911	1,213
120,0	258,90	1,2868	1984,7	6,597	0,914	1,218
140,0	291,11	1,3352	1999,3	6,552	0,917	1,222
160,0	321,11	1,3833	2014,3	6,513	0,920	1,226
180,0	349,16	1,4312	2029,4	6,479	0,923	1,229
200,0	375,47	1,4788	2044,6	6,448	0,926	1,232

T = 1400 K

0,1	0,26	1,0002	2024,9	8,667	0,904	1,181
1,0	2,57	1,0022	2025,4	8,029	0,904	1,182
5,0	12,75	1,0109	2027,8	7,582	0,905	1,184
10,0	25,23	1,0219	2030,8	7,389	0,906	1,186
20,0	49,39	1,0440	2036,9	7,195	0,907	1,191
30,0	72,54	1,0662	2043,2	7,081	0,909	1,195
40,0	94,73	1,0886	2049,7	7,000	0,910	1,199
50,0	116,02	1,1110	2056,4	6,937	0,912	1,203
60,0	136,45	1,1336	2063,3	6,885	0,913	1,206
70,0	156,08	1,1562	2070,2	6,841	0,915	1,209
80,0	174,96	1,1788	2077,3	6,803	0,916	1,212
90,0	193,12	1,2014	2084,5	6,770	0,918	1,214
100,0	210,61	1,2241	2091,8	6,739	0,919	1,217
120,0	243,73	1,2693	2106,6	6,687	0,922	1,221
140,0	274,60	1,3144	2121,7	6,643	0,925	1,225
160,0	303,46	1,3592	2137,0	6,604	0,928	1,228
180,0	330,55	1,4039	2152,4	6,570	0,930	1,231
200,0	356,03	1,4482	2167,9	6,539	0,933	1,234
220,0	380,07	1,4922	2183,6	6,512	0,935	1,237

Оксид азота

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
-----	--------	-----	-----	-----	-------	-------

$T = 1500 \text{ K}$						
0,1	0,24	1,0002	2143,5	8,749	0,912	1,190
1,0	2,40	1,0021	2144,0	8,111	0,913	1,190
5,0	11,91	1,0104	2146,6	7,664	0,913	1,192
10,0	23,57	1,0208	2149,8	7,471	0,914	1,194
20,0	46,19	1,0417	2156,3	7,278	0,915	1,198
30,0	67,92	1,0628	2163,1	7,164	0,917	1,202
40,0	88,79	1,0839	2170,0	7,083	0,918	1,205
50,0	108,87	1,1051	2177,0	7,020	0,920	1,208
60,0	128,18	1,1263	2184,1	6,969	0,921	1,211
70,0	146,77	1,1476	2191,4	6,925	0,922	1,213
80,0	164,69	1,1688	2198,7	6,887	0,924	1,216
90,0	181,97	1,1901	2206,1	6,854	0,925	1,218
100,0	198,64	1,2113	2213,7	6,824	0,926	1,220
120,0	230,31	1,2537	2228,9	6,772	0,929	1,224
140,0	259,94	1,2959	2244,3	6,727	0,931	1,227
160,0	287,75	1,3379	2259,9	6,689	0,934	1,230
180,0	313,92	1,3797	2275,6	6,655	0,936	1,233
200,0	338,61	1,4212	2291,4	6,625	0,938	1,236
220,0	361,97	1,4624	2307,3	6,597	0,941	1,238
240,0	384,13	1,5033	2323,2	6,572	0,943	1,240

$T = 1750 \text{ K}$						
0,1	0,21	1,0002	2443,0	8,935	0,929	1,206
1,0	2,06	1,0018	2443,7	8,297	0,929	1,206
5,0	10,22	1,0092	2446,6	7,851	0,930	1,208
10,0	20,25	1,0184	2450,2	7,658	0,930	1,209
20,0	39,78	1,0369	2457,6	7,466	0,931	1,212
30,0	58,63	1,0554	2465,1	7,352	0,932	1,214
40,0	76,82	1,0739	2472,7	7,272	0,933	1,217
50,0	94,40	1,0924	2480,4	7,209	0,934	1,219
60,0	111,39	1,1109	2488,1	7,158	0,936	1,221
70,0	127,83	1,1293	2495,9	7,115	0,937	1,223
80,0	143,75	1,1478	2503,8	7,077	0,938	1,224
90,0	159,16	1,1662	2511,7	7,044	0,939	1,226
100,0	174,10	1,1846	2519,7	7,014	0,940	1,228
120,0	202,65	1,2212	2535,7	6,963	0,942	1,230
140,0	229,57	1,2577	2551,9	6,919	0,944	1,233
160,0	255,02	1,2940	2568,1	6,881	0,946	1,235
180,0	279,12	1,3300	2584,5	6,847	0,947	1,237
200,0	302,01	1,3658	2600,8	6,817	0,949	1,239
220,0	323,79	1,4013	2617,2	6,790	0,951	1,241
240,0	344,54	1,4366	2633,7	6,766	0,953	1,243
260,0	364,37	1,4717	2650,1	6,743	0,955	1,244
280,0	383,33	1,5065	2666,5	6,721	0,956	1,246

$T = 2000 \text{ K}$						
0,1	0,18	1,0002	2746,1	9,099	0,941	1,218
1,0	1,80	1,0016	2746,9	8,461	0,941	1,218
5,0	8,95	1,0082	2750,0	8,015	0,941	1,219
10,0	17,75	1,0165	2754,0	7,823	0,942	1,220
20,0	34,94	1,0329	2761,9	7,630	0,943	1,222
30,0	51,59	1,0493	2769,9	7,517	0,944	1,224

Оксид азота

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
40,0	67,73	1,0658	2778,0	7,437	0,944	1,225
50,0	83,38	1,0822	2786,2	7,375	0,945	1,227
60,0	98,57	1,0985	2794,3	7,324	0,946	1,228
70,0	113,31	1,1148	2802,5	7,281	0,947	1,230
80,0	127,63	1,1311	2810,8	7,243	0,948	1,231
90,0	141,55	1,1474	2819,0	7,210	0,948	1,232
100,0	155,09	1,1636	2827,3	7,180	0,949	1,233
120,0	181,08	1,1959	2844,0	7,129	0,951	1,236
140,0	205,74	1,2280	2860,7	7,086	0,952	1,237
160,0	229,18	1,2599	2877,5	7,048	0,954	1,239
180,0	251,51	1,2915	2894,3	7,015	0,955	1,241
200,0	272,81	1,3230	2911,1	6,985	0,957	1,242
220,0	293,16	1,3542	2927,9	6,958	0,958	1,244
240,0	312,65	1,3853	2944,6	6,934	0,960	1,245
260,0	331,33	1,4161	2961,4	6,911	0,961	1,246
280,0	349,27	1,4467	2978,2	6,890	0,963	1,247

Таблица 3.17. Оксид азота

p	α	k	α/α_0	η	λ	Pr
-----	----------	-----	-------------------	--------	-----------	----

 $T=500\text{ K}$

0,1	436,6	1,38	1,001	277,0	39,7	0,709
1,0	438,0	1,38	1,007	277,9	39,9	0,711
2,0	439,7	1,39	1,015	278,9	40,1	0,713
3,0	441,3	1,40	1,021	280,0	40,4	0,716
4,0	443,1	1,41	1,028	281,1	40,6	0,718
5,0	444,9	1,42	1,034	282,2	40,8	0,721
6,0	446,8	1,43	1,040	283,4	41,1	0,723
8,0	450,7	1,45	1,051	285,9	41,6	0,728
10,0	454,8	1,47	1,060	288,5	42,1	0,733
12,0	459,2	1,49	1,068	291,3	42,6	0,738
16,0	468,6	1,53	1,079	297,2	43,7	0,747
20,0	478,9	1,58	1,085	303,5	44,9	0,755
25,0	492,7	1,65	1,086	311,9	46,3	0,765
30,0	507,4	1,72	1,080	320,7	47,8	0,773
35,0	522,9	1,79	1,069	329,8	49,4	0,780
40,0	539,0	1,86	1,054	339,1	50,9	0,787
45,0	555,4	1,93	1,036	348,5	52,4	0,792
50,0	572,2	2,01	1,016	357,9	53,9	0,798
60,0	606,0	2,15	0,974	376,6	56,9	0,806
70,0	639,8	2,30	0,932	394,9	59,7	0,813

 $T=600\text{ K}$

0,1	476,2	1,36	1,000	315,5	46,3	0,709
1,0	477,7	1,37	1,003	316,2	46,5	0,710
2,0	479,5	1,38	1,007	317,0	46,7	0,711
3,0	481,4	1,38	1,010	317,8	46,9	0,713
4,0	483,3	1,39	1,013	318,7	47,1	0,714
5,0	485,2	1,40	1,015	319,5	47,3	0,715

Оксид азота

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
6,0	487,1	1,41	1,018	320,5	47,5	0,717
8,0	491,2	1,42	1,022	322,3	47,9	0,719
10,0	495,3	1,44	1,026	324,3	48,3	0,722
12,0	499,6	1,46	1,028	326,4	48,8	0,724
16,0	508,5	1,49	1,032	330,8	49,7	0,729
20,0	517,9	1,53	1,032	335,5	50,6	0,734
25,0	530,3	1,58	1,029	341,8	51,8	0,739
30,0	543,1	1,62	1,022	348,3	53,0	0,744
35,0	556,5	1,68	1,013	355,1	54,2	0,748
40,0	570,2	1,73	1,001	362,2	55,4	0,752
45,0	584,2	1,78	0,988	369,3	56,6	0,756
50,0	598,4	1,83	0,973	376,6	57,9	0,759
60,0	627,1	1,94	0,942	391,2	60,3	0,765
70,0	656,0	2,04	0,909	405,8	62,7	0,770
80,0	684,8	2,14	0,877	420,3	65,0	0,774
90,0	713,2	2,24	0,847	434,5	67,3	0,778

$T=700$ K

0,1	512,0	1,35	1,000	351,2	52,9	0,709
1,0	513,7	1,36	1,001	351,7	53,0	0,710
2,0	515,6	1,36	1,003	352,4	53,2	0,711
3,0	517,4	1,37	1,004	353,1	53,3	0,711
4,0	519,4	1,38	1,005	353,7	53,5	0,712
5,0	521,3	1,38	1,006	354,4	53,7	0,713
6,0	523,3	1,39	1,006	355,2	53,9	0,714
8,0	527,2	1,40	1,007	356,7	54,2	0,715
10,0	531,3	1,42	1,008	358,2	54,6	0,717
12,0	535,5	1,43	1,008	359,9	55,0	0,718
16,0	544,0	1,46	1,007	363,3	55,7	0,721
20,0	552,9	1,49	1,005	367,0	56,5	0,723
25,0	564,2	1,53	0,999	371,9	57,5	0,726
30,0	576,0	1,56	0,992	377,1	58,5	0,729
35,0	588,0	1,60	0,983	382,4	59,5	0,732
40,0	600,3	1,64	0,973	388,0	60,5	0,735
45,0	612,7	1,68	0,961	393,7	61,6	0,737
50,0	625,3	1,73	0,949	399,5	62,6	0,739
60,0	650,7	1,81	0,923	411,3	64,7	0,743
70,0	676,4	1,89	0,897	423,3	66,8	0,747
80,0	701,9	1,97	0,870	435,4	68,8	0,750
90,0	727,3	2,04	0,844	447,3	70,8	0,753
100,0	752,4	2,12	0,819	459,2	72,7	0,756

$T=800$ K

0,1	545,2	1,34	1,000	384,7	59,2	0,709
1,0	546,9	1,35	1,000	385,2	59,3	0,710
2,0	548,8	1,35	1,000	385,7	59,5	0,710
3,0	550,7	1,36	1,000	386,3	59,6	0,711
4,0	552,6	1,36	1,000	386,8	59,8	0,711
5,0	554,5	1,37	1,000	387,4	59,9	0,712
6,0	556,4	1,37	1,000	388,0	60,1	0,712
8,0	560,4	1,39	0,999	389,2	60,4	0,713
10,0	564,3	1,40	0,998	390,5	60,7	0,714
12,0	568,4	1,41	0,997	391,8	61,0	0,714

Оксид азота

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
16,0	576,6	1,43	0,994	394,6	61,7	0,716
20,0	584,9	1,46	0,989	397,6	62,4	0,718
25,0	595,6	1,49	0,983	401,5	63,2	0,719
30,0	606,6	1,52	0,975	405,7	64,1	0,721
35,0	617,7	1,55	0,966	410,0	65,0	0,723
40,0	628,9	1,59	0,957	414,6	65,9	0,724
45,0	640,3	1,62	0,946	419,2	66,8	0,726
50,0	651,8	1,65	0,935	424,0	67,7	0,727
60,0	674,9	1,72	0,913	433,8	69,5	0,730
70,0	698,2	1,79	0,890	443,9	71,3	0,733
80,0	721,4	1,85	0,866	454,0	73,1	0,735
90,0	744,6	1,91	0,844	464,3	74,9	0,737
100,0	767,5	1,98	0,822	474,5	76,6	0,739
120,0	812,5	2,10	0,780	494,7	80,0	0,744

$T=900$ K

0,1	576,4	1,33	1,000	416,6	65,3	0,710
1,0	578,1	1,34	0,999	417,0	65,4	0,710
2,0	580,0	1,34	0,999	417,4	65,6	0,710
3,0	581,8	1,35	0,998	417,8	65,7	0,710
4,0	583,7	1,35	0,998	418,3	65,8	0,711
5,0	585,6	1,36	0,997	418,8	66,0	0,711
6,0	587,5	1,36	0,996	419,2	66,1	0,711
8,0	591,3	1,37	0,994	420,2	66,4	0,711
10,0	595,1	1,38	0,993	421,3	66,7	0,712
12,0	599,0	1,39	0,991	422,4	67,0	0,712
16,0	606,9	1,41	0,986	424,7	67,6	0,713
20,0	614,9	1,44	0,981	427,1	68,2	0,714
25,0	625,1	1,46	0,973	430,4	68,9	0,715
30,0	635,4	1,49	0,965	433,8	69,7	0,716
35,0	645,8	1,52	0,956	437,4	70,5	0,717
40,0	656,3	1,54	0,947	441,2	71,3	0,718
45,0	666,9	1,57	0,937	445,0	72,1	0,719
50,0	677,6	1,60	0,927	449,0	72,9	0,720
60,0	699,0	1,66	0,907	457,3	74,5	0,721
70,0	720,5	1,71	0,886	465,8	76,1	0,723
80,0	742,0	1,77	0,865	474,6	77,7	0,725
90,0	763,4	1,82	0,845	483,4	79,3	0,727
100,0	784,6	1,87	0,825	492,3	80,9	0,728
120,0	826,4	1,98	0,787	510,1	83,9	0,731
140,0	867,2	2,07	0,752	527,7	86,9	0,735

$T=1000$ K

0,1	606,0	1,32	1,00	447,0	71,2	0,710
1,0	607,6	1,33	0,999	447,3	71,3	0,710
5,0	614,9	1,35	0,995	448,8	71,8	0,710
10,0	624,2	1,37	0,989	450,9	72,5	0,711
20,0	643,3	1,42	0,975	455,7	73,8	0,711
30,0	662,7	1,46	0,959	461,3	75,2	0,712
40,0	682,5	1,51	0,942	467,5	76,6	0,713
50,0	702,5	1,56	0,923	474,2	78,0	0,714
60,0	722,6	1,61	0,904	481,2	79,5	0,715
70,0	742,8	1,66	0,885	488,5	81,0	0,716
80,0	762,9	1,71	0,866	496,0	82,4	0,718

Оксид азота

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
90,0	782,9	1,75	0,847	503,7	83,9	0,719
100,0	802,8	1,80	0,828	511,5	85,3	0,720
120,0	842,0	1,89	0,793	527,2	88,1	0,722
140,0	880,4	1,97	0,761	543,0	90,8	0,725
160,0	917,8	2,06	0,731	558,6	93,5	0,728

 $T=1100$ K

0,1	634,1	1,32	1,00	476,2	76,9	0,710
1,0	635,7	1,32	0,999	476,5	77,0	0,710
5,0	642,9	1,34	0,994	477,7	77,5	0,710
10,0	651,9	1,36	0,987	479,4	78,1	0,710
20,0	670,3	1,40	0,972	483,5	79,3	0,710
30,0	688,9	1,44	0,956	488,2	80,5	0,710
40,0	707,8	1,49	0,939	493,4	81,8	0,710
50,0	726,8	1,53	0,921	499,1	83,1	0,710
60,0	745,8	1,57	0,903	505,2	84,5	0,711
70,0	764,8	1,62	0,885	511,5	85,8	0,711
80,0	783,8	1,66	0,867	518,0	87,1	0,712
90,0	802,7	1,70	0,850	524,8	88,4	0,713
100,0	821,5	1,74	0,832	531,6	89,8	0,713
120,0	858,6	1,82	0,800	545,6	92,4	0,715
140,0	894,9	1,90	0,769	559,7	94,9	0,717
160,0	930,4	1,97	0,741	573,9	97,4	0,719
180,0	965,1	1,04	0,715	587,9	99,8	0,721

 $T=1200$ K

0,1	661,1	1,31	1,000	504,4	82,4	0,710
1,0	662,7	1,32	0,999	504,6	82,5	0,71
5,0	669,6	1,33	0,993	505,6	82,9	0,709
10,0	678,4	1,35	0,986	507,0	83,5	0,709
20,0	696,2	1,39	0,970	510,4	84,6	0,708
30,0	714,1	1,43	0,954	514,4	85,7	0,708
40,0	732,1	1,47	0,937	518,9	86,9	0,708
50,0	750,3	1,51	0,920	523,8	88,1	0,708
60,0	768,4	1,54	0,903	529,0	89,3	0,707
70,0	786,5	1,58	0,886	534,5	90,6	0,708
80,0	804,6	1,62	0,869	540,3	91,8	0,708
90,0	822,5	1,66	0,853	546,2	93,0	0,708
100,0	840,4	1,69	0,837	552,3	94,2	0,708
120,0	875,5	1,76	0,806	564,7	96,7	0,709
140,0	910,3	1,83	0,777	577,4	99,0	0,711
160,0	944,2	1,90	0,750	590,2	101,4	0,712
180,0	977,3	1,96	0,725	603,1	103,6	0,714
200,0	1009,7	2,03	0,702	615,9	105,9	0,716

 $T=1300$ K

0,1	687,0	1,31	1,000	531,6	87,7	0,710
1,0	688,6	1,31	0,999	531,8	87,8	0,710
5,0	695,4	1,33	0,993	532,6	88,2	0,709
10,0	703,9	1,34	0,985	533,8	88,7	0,709
20,0	721,1	1,38	0,969	536,7	89,8	0,707
30,0	738,4	1,41	0,953	540,1	90,8	0,707
40,0	755,7	1,45	0,937	543,9	91,9	0,706
50,0	773,1	1,48	0,921	548,1	93,0	0,705

Оксид азота

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
60,0	790,5	1,52	0,904	552,7	94,2	0,705
70,0	807,8	1,55	0,888	557,5	95,3	0,705
80,0	825,1	1,59	0,872	562,6	96,4	0,704
90,0	842,2	1,62	0,856	567,8	97,6	0,704
100,0	859,3	1,66	0,841	573,2	98,7	0,705
120,0	893,0	1,72	0,812	584,3	100,9	0,705
140,0	926,1	1,78	0,784	595,8	103,2	0,706
160,0	958,6	1,84	0,759	607,4	105,4	0,707
180,0	990,5	1,90	0,735	619,2	107,5	0,708
200,0	1021,6	1,96	0,713	630,9	109,6	0,709

 $T=1400\text{ K}$

0,1	712,1	1,31	1,000	558,1	92,9	0,710
1,0	713,5	1,31	0,999	558,2	93,0	0,710
5,0	720,1	1,32	0,992	558,9	93,3	0,709
10,0	728,4	1,34	0,985	559,9	93,8	0,708
20,0	745,1	1,37	0,969	562,3	94,8	0,707
30,0	761,8	1,40	0,953	565,2	95,8	0,705
40,0	778,6	1,44	0,937	568,5	96,8	0,704
50,0	795,3	1,47	0,922	572,2	97,8	0,704
60,0	812,0	1,50	0,906	576,1	98,9	0,703
70,0	828,7	1,53	0,890	580,4	99,9	0,702
80,0	845,2	1,56	0,875	584,8	101,0	0,702
90,0	861,7	1,59	0,860	589,5	102,0	0,702
100,0	878,1	1,62	0,846	594,3	103,1	0,701
120,0	910,5	1,68	0,818	604,2	105,2	0,701
140,0	942,3	1,74	0,792	614,6	107,3	0,702
160,0	973,6	1,80	0,767	625,2	109,4	0,702
180,0	1004,2	1,85	0,744	636,0	111,4	0,703
200,0	1034,3	1,90	0,722	646,8	113,4	0,704
220,0	1063,7	1,95	0,702	657,7	115,4	0,705

 $T=1500\text{ K}$

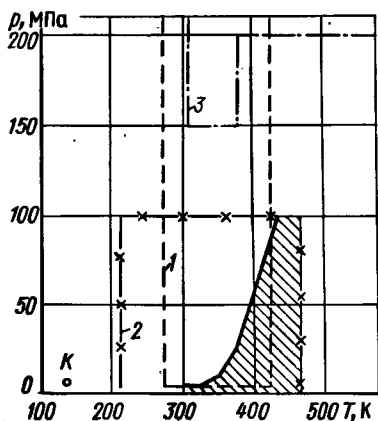
0,1	736,2	1,30	1,000	583,8	97,9	0,710
1,0	737,7	1,31	0,998	583,9	98,0	0,709
5,0	744,1	1,32	0,992	584,5	98,3	0,709
10,0	752,2	1,33	0,985	585,3	98,7	0,708
20,0	768,4	1,36	0,969	587,4	99,7	0,706
30,0	784,6	1,39	0,954	589,8	100,6	0,705
40,0	800,8	1,42	0,938	592,7	101,5	0,703
50,0	816,9	1,45	0,923	595,8	102,5	0,702
60,0	833,1	1,48	0,908	599,3	103,5	0,701
70,0	849,1	1,51	0,893	603,0	104,5	0,700
80,0	865,1	1,54	0,878	607,0	105,5	0,700
90,0	881,0	1,57	0,864	611,1	106,5	0,699
100,0	896,7	1,60	0,850	615,4	107,4	0,699
120,0	927,9	1,65	0,823	624,4	109,4	0,698
140,0	958,6	1,71	0,798	633,7	111,4	0,698
160,0	988,8	1,76	0,775	643,4	113,4	0,698
180,0	1018,4	1,81	0,752	653,3	115,3	0,699
200,0	1047,4	1,86	0,732	663,3	117,2	0,699
220,0	1075,9	1,90	0,712	673,3	119,1	0,700
240,0	1103,8	1,95	0,694	683,4	120,9	0,701

Оксид азота

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T = 1750 \text{ K}$						
0,1	793,5	1,30	1,000	645,5	109,8	0,709
1,0	794,9	1,30	0,999	645,5	109,9	0,709
5,0	801,0	1,31	0,993	645,9	110,2	0,708
10,0	808,5	1,32	0,985	646,4	110,5	0,707
20,0	823,6	1,35	0,970	647,6	111,3	0,705
30,0	838,7	1,37	0,956	649,3	112,1	0,703
40,0	853,8	1,40	0,941	651,2	113,0	0,701
50,0	868,7	1,42	0,927	653,5	113,8	0,700
60,0	883,6	1,45	0,913	656,0	114,6	0,699
70,0	898,5	1,47	0,900	658,7	115,5	0,697
80,0	913,2	1,50	0,887	661,7	116,3	0,696
90,0	927,8	1,52	0,874	664,8	117,2	0,695
100,0	942,4	1,55	0,861	668,0	118,1	0,695
120,0	971,2	1,59	0,837	675,0	119,8	0,693
140,0	999,5	1,64	0,814	682,4	121,5	0,692
160,0	1027,4	1,68	0,792	690,1	123,2	0,692
180,0	1054,8	1,73	0,772	698,1	124,9	0,691
200,0	1081,7	1,77	0,753	706,2	126,6	0,691
220,0	1108,2	1,81	0,734	714,6	128,3	0,691
240,0	1134,2	1,85	0,717	723,0	129,9	0,692
260,0	1159,8	1,88	0,701	731,5	131,6	0,692
280,0	1184,9	1,92	0,686	740,0	133,2	0,692
$T = 2000 \text{ K}$						
0,1	847,1	1,29	1,000	703,9	121,0	0,709
1,0	848,4	1,30	0,999	703,9	121,1	0,708
5,0	854,1	1,31	0,993	704,1	121,3	0,707
10,0	861,2	1,32	0,986	704,3	121,7	0,706
20,0	875,4	1,34	0,972	705,1	122,4	0,704
30,0	889,6	1,36	0,958	706,2	123,1	0,702
40,0	903,7	1,38	0,945	707,5	123,8	0,700
50,0	917,7	1,40	0,932	709,1	124,5	0,699
60,0	931,6	1,43	0,919	710,9	125,3	0,697
70,0	945,5	1,45	0,907	712,9	126,0	0,696
80,0	959,3	1,47	0,895	715,1	126,8	0,695
90,0	972,9	1,49	0,883	717,5	127,5	0,693
100,0	986,5	1,51	0,871	720,0	128,3	0,692
120,0	1013,4	1,55	0,849	725,4	129,8	0,690
140,0	1039,9	1,59	0,828	731,3	131,3	0,689
160,0	1066,0	1,63	0,808	737,5	132,9	0,688
180,0	1091,6	1,67	0,789	744,0	134,4	0,687
200,0	1116,9	1,70	0,771	750,7	135,7	0,686
220,0	1141,8	1,74	0,754	757,6	137,4	0,686
240,0	1166,2	1,77	0,738	764,7	138,9	0,685
260,0	1190,3	1,81	0,722	771,9	140,4	0,685
280,0	1214,0	1,84	0,708	779,2	141,8	0,685

3.7. Оксид углерода

Некоторые сведения об экспериментальных данных о сжимаемости оксида углерода приведены в табл. 3.18.



← Рис. 3.9. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости оксида углерода в газообразном состоянии:
1 — [130]; 2 — [131]; 3 — [133]

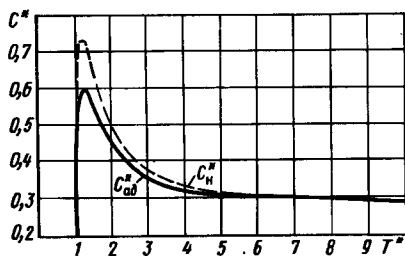


Рис. 3.10. Неаддитивный третий вириальный коэффициент оксида углерода C_{III}^*

Наибольшего внимания заслуживает работа [132]. Измерения проведены традиционным для Ван-дер-Ваальсовской лаборатории методом пьезометра переменного объема с высокой точностью. Погрешность измерения сжимаемости в [131] составляет 0,2—0,3%. Проведение эксперимента в области высоких давлений связано с большими трудностями, поэтому погрешность данных [133] составляет не менее 0,25%.

На рис. 3.9 в pT -координатах представлены области экспериментального исследования сжимаемости оксида углерода в указанных работах. Заштрихована область данных, использованных для получения теоретически обоснованного уравнения состояния оксида углерода.

Уравнение состояния получено в виде (1.3). В программу расчета констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6) заложено 89 точек в интервале температур 323,15—573,15 К и плотностей $\rho = 0 \div 600$ кг/м³.

При обработке экспериментальных данных использованы полиномы, аппроксимирующие второй, четвертый и пятый приведенные вириальные коэффициенты в интервале $T^* = 1 \div 20$ (см. § 2.1).

Введена поправка на неаддитивность в третий вириальный коэффициент. Неаддитивный третий вириальный коэффициент оксида углерода описан полиномом вида $C^* = \sum_{i=0}^7 c_i \tau^i$. Константы этого полинома имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1,59332954 \cdot 10^{-1} & c_4 &= 4,76904685 \cdot 10^1 \\ c_1 &= 1,99773659 \cdot 10^0 & c_5 &= -2,80388362 \cdot 10^2 \\ c_2 &= -1,04000460 \cdot 10^1 & c_6 &= 4,68325078 \cdot 10^2 \\ c_3 &= 2,03504194 \cdot 10^1 & c_7 &= -2,75094077 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

Таблица 3.18. Работы, в которых исследована сжимаемость оксида углерода в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Авторы	Литература
298	1—17	Скотт (1929)	[130]
200—473	0,1—100	Бартлетт, Хезерингтон, Квалнес (1930)	[131]
273—423	1—280	Михельс (1952)	[132]
308—573	150—1000	Робертсон, Бэбб (1970)	[133]

На рис. 3.10 показан ход неаддитивного третьего вириального коэффициента оксида углерода.

В результате обработки экспериментальных данных о сжимаемости получены константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для оксида углерода: $b_0 = 2,25415588 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $\epsilon/k = 100,473972 \text{ К}$.

Средняя квадратическая погрешность описания экспериментальных данных полученным уравнением состояния оксида углерода составляет 0,11%, причем данные [132] описываются с погрешностью 0,06, данные [131] — с погрешностью 0,14 и данные [133] с погрешностью 0,3%.

В обработку включены только три точки из работы [133]:

$$T = 473,15 \text{ К}; \quad p = 209,3 \text{ МПа}; \quad \rho = 603,13 \text{ кг/м}^3;$$

$$T = 573,15 \text{ К}; \quad p = 236,5 \text{ МПа}; \quad \rho = 582,32 \text{ кг/м}^3;$$

$$T = 573,15 \text{ К}; \quad p = 256,6 \text{ МПа}; \quad \rho = 602,30 \text{ кг/м}^3.$$

Это связано с ограничением уравнения состояния, основанного на использовании потенциала Леннарда-Джонса (12-6), по плотности при невысоких температурах из-за наличия только пяти вириальных коэффициентов. Эти точки, естественно, имеют малый вес, однако дают возможность проверить, насколько хорошо экстраполируется уравнение состояния. Отклонение расчетных значений сжимаемости от экспериментальных при указанных выше параметрах составляет 0,3%, что соответствует точности эксперимента в работе [133].

По полученному уравнению состояния рассчитаны таблицы термодинамических свойств оксида углерода.

Таблицы идеально-газовых функций оксида углерода представлены Национальным бюро стандартов США [36]. Приведенные в [36] значения энтальпии, теплоемкости и энтропии аппроксимированы полиномами вида (3.2) по обратным степеням температур в интервале 300–3000 К. Средняя квадратическая погрешность аппроксимации энтальпии 0,006, теплоемкости — 0,02 и энтропии — 0,01%.

За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. По данным [37] для оксида углерода теплота сублимации $\Delta h_0^0 = 8,034 \text{ кДж/моль}$. С учетом последней коэффициенты аппроксимации идеально-газовых функций оксида углерода имеют следующие значения:

$\alpha_0 = 4,5860747 \cdot 10^0$	$\beta_0 = 4,64629732 \cdot 10^0$	$\gamma_0 = 3,94746533 \cdot 10^1$
$\alpha_1 = -0,89044561 \cdot 10^0$	$\beta_1 = -3,66319829 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_1 = -2,91275242 \cdot 10^1$
$\alpha_2 = 1,32679977 \cdot 10^0$	$\beta_2 = -4,69593035 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_2 = 3,65579511 \cdot 10^1$
$\alpha_3 = -4,90518433 \cdot 10^1$	$\beta_3 = -4,73606790 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_3 = -3,02383715 \cdot 10^1$
$\alpha_4 = 9,27972959 \cdot 10^{-2}$	$\beta_4 = 4,18171508 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_4 = 1,55865856 \cdot 10^1$
$\alpha_5 = -7,12129042 \cdot 10^{-3}$	$\beta_5 = -2,40801733 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_5 = -4,80514119 \cdot 10^0$
	$\beta_6 = -4,67556651 \cdot 10^{-3}$	$\gamma_6 = 8,07607057 \cdot 10^{-1}$
		$\gamma_7 = -5,67607900 \cdot 10^{-2}$

Свойства переноса оксида углерода рассчитаны на основе потенциала Леннарда-Джонса (12-6) с параметрами, полученными по данным о сжимаемости.

Коэффициент динамической вязкости при атмосферном давлении рассчитан по уравнению Энскога (1.24), в котором использована аппроксимация $f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2,2)}$, приведенная в § 2.1.

Вязкость при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению с тремя членами ряда (1.25). Константы аппроксимации комплексов $B_{\eta}^* f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2,2)}$ и $C_{\eta}^* f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2,2)}$ использованы те же, что и в § 2.1.

Теплопроводность при атмосферном давлении рассчитана по уравнению Мейсона и Мончика (1.27). Функция $\beta_0(T^*)$ для оксида углерода рассчитана и аппроксимирована полиномом

$$\beta_0(T^*) = \sum_{i=1}^6 m_i (\epsilon/(kT))^i.$$

Теплопроводность оксида углерода при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению вида (1.25), в котором

$$\frac{B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{j=1}^5 p_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{s_j}; \quad \frac{C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}}{\Omega^{(2.2)*}} = \sum_{j=1}^6 q_j \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^{t_j}.$$

Для комплекса $C_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$ использованы те же значения констант аппроксимации и соответствующих им степеней аргументов, что и в § 2.1.

Значения B_{λ}^* для оксида углерода рассчитаны по методике, предложенной в [22], и комплекс $B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$ аппроксимирован полиномом по обратным степеням приведенной температуры.

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов и степени аргументов в них для β_0 и $B_{\lambda}^* f_{\lambda}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}$ оксида углерода приводятся ниже:

$$\begin{array}{llll} m_1 = 7,33990 \cdot 10^2 & s_1 = 5 & p_1 = -5,76250 \cdot 10^0 & s_1 = 2,5 \\ m_2 = -7,36240 \cdot 10^2 & s_2 = 4 & p_2 = 1,72150 \cdot 10^1 & s_2 = 2,0 \\ m_3 = 2,60430 \cdot 10^2 & s_3 = 3 & p_3 = -1,70650 \cdot 10^1 & s_3 = 1,5 \\ m_4 = -3,26020 \cdot 10^1 & s_4 = 2 & p_4 = 6,76200 \cdot 10^0 & s_4 = 1,0 \\ m_5 = -1,17570 \cdot 10^0 & s_5 = 1 & p_5 = 1,48910 \cdot 10^{-1} & s_5 = 0 \\ m_6 = 1,76900 \cdot 10^0 & s_6 = 0 & & \end{array}$$

При расчете таблиц теплофизических свойств использовались следующие значения физических констант оксида углерода:

масса моля $\mu = 28,01$ г/моль;

газовая постоянная $R = 296,835$ Дж/(кг · К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 8034$ Дж/кмоль;

параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\varepsilon/k = 100,473972$ К; $b_0 = 2,25415588 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Таблицы рассчитаны в интервале 500—2250 К. Результаты расчета теплофизических свойств оксида углерода приведены в табл. 3.19 и 3.20.

Таблица 3.19. Оксид углерода

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 500$ К						
0,1	0,67	1,0004	808,1	7,599	0,767	1,064
1,0	6,71	1,0037	807,6	6,913	0,768	1,069
2,0	13,37	1,0076	807,1	6,705	0,769	1,074
3,0	19,98	1,0115	806,5	6,583	0,769	1,079
4,0	26,54	1,0156	806,1	6,495	0,770	1,084
5,0	33,04	1,0198	805,6	6,427	0,771	1,089
6,0	39,48	1,0241	805,2	6,371	0,771	1,093
8,0	52,18	1,0330	804,4	6,282	0,773	1,102
10,0	64,64	1,0423	803,8	6,212	0,774	1,111
12,0	76,85	1,0521	803,3	6,154	0,775	1,119
16,0	100,50	1,0727	802,5	6,062	0,778	1,134
20,0	123,10	1,0947	802,1	5,989	0,781	1,147
25,0	149,88	1,1238	802,2	5,916	0,784	1,161
30,0	175,07	1,1546	802,8	5,855	0,787	1,172
35,0	198,74	1,1866	803,9	5,804	0,789	1,182
40,0	220,97	1,2197	805,4	5,759	0,792	1,191
45,0	241,87	1,2535	807,2	5,720	0,795	1,198

Оксид углерода

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=600\text{ K}$						
0,1	0,56	1,0004	915,6	7,793	0,790	1,087
1,0	5,59	1,0041	915,5	7,108	0,790	1,090
2,0	11,14	1,0083	915,4	6,901	0,791	1,094
3,0	16,64	1,0125	915,3	6,779	0,792	1,097
4,0	22,09	1,0168	915,2	6,692	0,792	1,100
5,0	27,49	1,0211	915,1	6,625	0,793	1,103
6,0	32,85	1,0255	915,1	6,569	0,793	1,106
8,0	43,42	1,0345	915,1	6,481	0,794	1,112
10,0	53,80	1,0437	915,1	6,413	0,795	1,118
12,0	63,98	1,0532	915,2	6,356	0,796	1,124
16,0	83,76	1,0726	915,7	6,266	0,799	1,134
20,0	102,77	1,0927	916,4	6,196	0,801	1,143
25,0	125,46	1,1188	917,7	6,125	0,803	1,153
30,0	147,01	1,1458	919,3	6,066	0,806	1,162
35,0	167,47	1,1734	921,3	6,016	0,808	1,170
40,0	186,90	1,2017	923,5	5,973	0,810	1,176
45,0	205,35	1,2304	926,0	5,935	0,813	1,182
50,0	222,89	1,2595	928,7	5,900	0,815	1,188
$T=700\text{ K}$						
0,1	0,48	1,0004	1025,6	7,964	0,816	1,113
1,0	4,79	1,0041	1025,7	7,279	0,816	1,115
2,0	9,55	1,0082	1025,9	7,073	0,817	1,118
3,0	14,26	1,0124	1026,1	6,951	0,817	1,120
4,0	18,94	1,0166	1026,3	6,865	0,818	1,122
5,0	23,57	1,0208	1026,5	6,798	0,818	1,125
6,0	28,17	1,0250	1026,7	6,743	0,819	1,127
8,0	37,25	1,0337	1027,2	6,655	0,820	1,131
10,0	46,17	1,0424	1027,7	6,588	0,821	1,135
12,0	54,94	1,0513	1028,3	6,532	0,822	1,139
16,0	72,01	1,0693	1029,7	6,443	0,823	1,147
20,0	88,49	1,0878	1031,2	6,374	0,825	1,154
25,0	108,26	1,1114	1033,3	6,304	0,827	1,161
30,0	127,16	1,1354	1035,7	6,247	0,829	1,168
35,0	145,22	1,1599	1038,4	6,198	0,832	1,174
40,0	162,49	1,1847	1041,2	6,156	0,834	1,180
45,0	179,01	1,2098	1044,2	6,118	0,836	1,185
50,0	194,82	1,2352	1047,4	6,084	0,838	1,189
60,0	224,48	1,2864	1054,3	6,026	0,842	1,197
$T=800\text{ K}$						
0,1	0,42	1,0004	1138,2	8,115	0,842	1,139
1,0	4,19	1,0039	1138,5	7,431	0,843	1,141
2,0	8,36	1,0079	1138,9	7,225	0,843	1,143
3,0	12,49	1,0118	1139,3	7,104	0,843	1,144
4,0	16,58	1,0158	1139,7	7,018	0,844	1,146
5,0	20,65	1,0198	1140,1	6,951	0,844	1,148
6,0	24,68	1,0239	1140,5	6,896	0,845	1,149
8,0	32,64	1,0320	1141,4	6,809	0,845	1,153
10,0	40,48	1,0402	1142,3	6,742	0,846	1,156
12,0	48,20	1,0484	1143,2	6,687	0,847	1,159
16,0	63,26	1,0651	1145,2	6,599	0,848	1,164
20,0	77,83	1,0821	1147,3	6,530	0,850	1,170

Оксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
25,0	95,40	1,1035	1150,1	6,462	0,852	1,176
30,0	112,27	1,1253	1153,1	6,405	0,854	1,181
35,0	128,47	1,1473	1156,3	6,357	0,856	1,186
40,0	144,04	1,1695	1159,7	6,315	0,857	1,190
45,0	159,00	1,1918	1163,1	6,278	0,859	1,195
50,0	173,39	1,2143	1166,8	6,245	0,861	1,198
60,0	200,59	1,2596	1174,3	6,188	0,864	1,205
70,0	225,85	1,3052	1182,2	6,139	0,868	1,210
80,0	249,39	1,3508	1190,5	6,097	0,871	1,215

T=900 K

0,1	0,37	1,0004	1253,3	8,251	0,866	1,163
1,0	3,73	1,0037	1253,8	7,567	0,867	1,165
2,0	7,43	1,0074	1254,3	7,361	0,867	1,166
3,0	11,11	1,0112	1254,9	7,240	0,867	1,167
4,0	14,75	1,0149	1255,4	7,154	0,868	1,169
5,0	18,37	1,0187	1256,0	7,088	0,868	1,170
6,0	21,97	1,0225	1256,5	7,033	0,868	1,171
8,0	29,07	1,0301	1257,7	6,947	0,869	1,174
10,0	36,07	1,0377	1258,8	6,879	0,870	1,176
12,0	42,97	1,0454	1260,0	6,824	0,870	1,178
16,0	56,46	1,0608	1262,5	6,737	0,872	1,183
20,0	69,55	1,0764	1265,1	6,669	0,873	1,187
25,0	85,38	1,0961	1268,5	6,601	0,875	1,192
30,0	100,63	1,1159	1272,0	6,545	0,876	1,196
35,0	115,34	1,1359	1275,6	6,498	0,878	1,200
40,0	129,53	1,1560	1279,3	6,457	0,880	1,204
45,0	143,22	1,1761	1283,2	6,420	0,881	1,207
50,0	156,44	1,1964	1287,1	6,387	0,883	1,210
60,0	181,55	1,2371	1295,3	6,331	0,886	1,216
70,0	205,04	1,2779	1303,7	6,282	0,889	1,220
80,0	227,08	1,3187	1312,4	6,241	0,891	1,225
90,0	247,80	1,3595	1321,3	6,204	0,894	1,228

T=1000 K

0,1	0,34	1,0003	1370,7	8,374	0,888	1,185
1,0	3,36	1,0035	1371,3	7,690	0,888	1,186
5,0	16,55	1,0176	1373,9	7,211	0,889	1,190
10,0	32,54	1,0353	1377,4	7,004	0,891	1,195
20,0	62,90	1,0712	1384,6	6,795	0,894	1,203
30,0	91,26	1,1075	1392,3	6,671	0,897	1,211
40,0	117,78	1,1441	1400,4	6,583	0,899	1,217
50,0	142,63	1,1810	1408,7	6,515	0,902	1,222
60,0	165,97	1,2179	1417,4	6,459	0,905	1,227
70,0	187,92	1,2549	1426,3	6,411	0,907	1,231
80,0	208,62	1,2918	1435,4	6,370	0,910	1,235
90,0	228,18	1,3287	1444,6	6,333	0,912	1,238
100,0	246,71	1,3655	1454,0	6,300	0,915	1,241

T=1100 K

0,1	0,31	1,0003	1490,2	8,487	0,907	1,204
1,0	3,05	1,0033	1490,8	7,803	0,907	1,204
5,0	15,07	1,0165	1493,8	7,324	0,908	1,208
10,0	29,65	1,0330	1497,7	7,117	0,909	1,212

Оксид углерода

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
20,0	57,44	1,0664	1505,7	6,909	0,912	1,219
30,0	83,53	1,1000	1514,0	6,786	0,914	1,225
40,0	108,06	1,1337	1522,7	6,699	0,917	1,230
50,0	131,16	1,1675	1531,6	6,631	0,919	1,234
60,0	152,95	1,2014	1540,7	6,575	0,921	1,238
70,0	173,56	1,2352	1549,9	6,528	0,923	1,242
80,0	193,07	1,2690	1559,4	6,487	0,926	1,245
90,0	211,59	1,3027	1568,9	6,450	0,928	1,248
100,0	229,19	1,3363	1578,5	6,418	0,930	1,250

$T=1200$ K

0,1	0,28	1,0003	1611,3	8,591	0,923	1,220
1,0	2,80	1,0031	1612,1	7,908	0,923	1,221
5,0	13,82	1,0154	1615,4	7,429	0,924	1,223
10,0	27,23	1,0309	1619,6	7,222	0,925	1,226
20,0	52,87	1,0620	1628,2	7,014	0,927	1,232
30,0	77,04	1,0933	1637,1	6,892	0,930	1,237
40,0	99,86	1,1245	1646,2	6,805	0,932	1,241
50,0	121,45	1,1558	1655,5	6,738	0,934	1,245
60,0	141,90	1,1870	1665,0	6,682	0,936	1,249
70,0	161,31	1,2182	1674,6	6,635	0,938	1,252
80,0	179,77	1,2493	1684,3	6,594	0,940	1,254
90,0	197,34	1,2804	1694,1	6,558	0,941	1,257
100,0	214,10	1,3112	1704,0	6,526	0,943	1,259
120,0	245,43	1,3726	1724,0	6,470	0,947	1,263

$T=1300$ K

0,1	0,26	1,0003	1734,1	8,689	0,937	1,234
1,0	2,58	1,0029	1734,9	8,005	0,937	1,235
5,0	12,77	1,0145	1738,4	7,527	0,938	1,237
10,0	25,18	1,0290	1742,9	7,320	0,939	1,239
20,0	48,98	1,0582	1752,1	7,113	0,941	1,244
30,0	71,50	1,0873	1761,4	6,991	0,943	1,248
40,0	92,85	1,1164	1770,9	6,904	0,945	1,252
50,0	113,12	1,1455	1780,6	6,837	0,946	1,255
60,0	132,38	1,1745	1790,3	6,782	0,948	1,258
70,0	150,74	1,2034	1800,2	6,735	0,950	1,260
80,0	168,24	1,2323	1810,2	6,694	0,952	1,263
90,0	184,96	1,2610	1820,2	6,658	0,953	1,265
100,0	200,95	1,2896	1830,3	6,626	0,955	1,267
120,0	230,96	1,3464	1850,6	6,571	0,958	1,270

$T=1400$ K

0,1	0,24	1,0003	1858,1	8,780	0,950	1,246
1,0	2,40	1,0027	1859,0	8,097	0,950	1,247
5,0	11,87	1,0137	1862,7	7,619	0,950	1,249
10,0	23,42	1,0273	1867,4	7,412	0,951	1,251
20,0	45,63	1,0547	1877,0	7,205	0,953	1,255
30,0	66,72	1,0820	1886,7	7,084	0,954	1,258
40,0	86,78	1,1092	1896,6	6,997	0,956	1,261
50,0	105,88	1,1364	1906,5	6,930	0,958	1,264
60,0	124,10	1,1634	1916,6	6,875	0,959	1,266
70,0	141,50	1,1904	1926,7	6,828	0,961	1,269
80,0	158,14	1,2173	1936,9	6,788	0,962	1,271

Оксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
90,0	174,08	1,2441	1947,1	6,752	0,964	1,272
100,0	189,37	1,2707	1957,4	6,720	0,965	1,274
120,0	218,16	1,3236	1978,0	6,665	0,968	1,277
140,0	244,83	1,3760	1998,7	6,618	0,970	1,280

T = 1500 K

0,1	0,22	1,0003	1983,3	8,867	0,960	1,257
1,0	2,24	1,0026	1984,2	8,183	0,960	1,257
5,0	11,09	1,0129	1988,1	7,705	0,961	1,259
10,0	21,89	1,0258	1993,0	7,499	0,962	1,261
20,0	42,72	1,0515	2003,0	7,292	0,963	1,264
30,0	62,55	1,0772	2013,0	7,171	0,965	1,267
40,0	81,47	1,1028	2023,1	7,084	0,966	1,269
50,0	99,53	1,1282	2033,3	7,017	0,967	1,272
60,0	116,81	1,1536	2043,6	6,963	0,969	1,274
70,0	133,35	1,1789	2053,9	6,916	0,970	1,276
80,0	149,22	1,2041	2064,3	6,876	0,971	1,278
90,0	164,45	1,2292	2074,7	6,840	0,973	1,279
100,0	179,09	1,2541	2085,1	6,808	0,974	1,281
120,0	206,74	1,3036	2106,1	6,753	0,976	1,283
140,0	232,46	1,3526	2127,0	6,706	0,979	1,286

T = 1750 K

0,1	0,19	1,0002	2300,5	9,064	0,982	1,278
1,0	1,92	1,0023	2301,4	8,380	0,982	1,279
5,0	9,52	1,0113	2305,7	7,902	0,982	1,280
10,0	18,83	1,0225	2310,9	7,696	0,983	1,281
20,0	36,85	1,0449	2321,5	7,490	0,984	1,283
30,0	54,12	1,0672	2332,2	7,369	0,985	1,285
40,0	70,69	1,0894	2342,8	7,283	0,986	1,287
50,0	86,60	1,1114	2353,5	7,216	0,987	1,288
60,0	101,91	1,1334	2364,2	7,162	0,988	1,290
70,0	116,65	1,1552	2375,0	7,115	0,989	1,291
80,0	130,85	1,1770	2385,7	7,075	0,990	1,292
90,0	144,55	1,1986	2396,4	7,040	0,991	1,293
100,0	157,78	1,2201	2407,2	7,008	0,991	1,294
120,0	182,94	1,2628	2428,7	6,953	0,993	1,296
140,0	206,53	1,3050	2450,1	6,907	0,995	1,298
160,0	228,71	1,3467	2471,6	6,867	0,997	1,300
180,0	249,64	1,3880	2492,9	6,831	0,998	1,301

T = 2000 K

0,1	0,17	1,0002	2622,2	9,237	0,997	1,294
1,0	1,68	1,0020	2623,2	8,554	0,997	1,294
5,0	8,34	1,0100	2627,6	8,076	0,998	1,295
10,0	16,52	1,0199	2633,2	7,870	0,998	1,296
20,0	32,40	1,0397	2644,2	7,664	0,999	1,297
30,0	47,70	1,0594	2655,2	7,543	1,000	1,298
40,0	62,45	1,0789	2666,3	7,458	1,000	1,300
50,0	76,68	1,0984	2677,3	7,391	1,001	1,301
60,0	90,42	1,1177	2688,3	7,337	1,002	1,302
70,0	103,71	1,1369	2699,3	7,290	1,003	1,303
80,0	116,57	1,1560	2710,3	7,251	1,003	1,304
90,0	129,02	1,1751	2721,3	7,215	1,004	1,305

Оксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
100,0	141,08	1,1940	2732,3	7,184	1,005	1,305
120,0	164,14	1,2315	2754,2	7,129	1,006	1,307
140,0	185,90	1,2685	2776,1	7,083	1,007	1,308
160,0	206,48	1,3052	2797,8	7,043	1,009	1,309
180,0	226,00	1,3416	2819,5	7,007	1,010	1,310
200,0	244,56	1,3775	2841,0	6,976	1,011	1,311
<i>T</i> = 2250 К						
0,1	0,15	1,0002	2947,4	9,392	1,009	1,306
1,0	1,49	1,0018	2948,4	8,708	1,009	1,306
5,0	7,42	1,0089	2952,9	8,230	1,009	1,306
10,0	14,71	1,0178	2958,6	8,025	1,010	1,307
20,0	28,92	1,0355	2969,9	7,819	1,010	1,308
30,0	42,65	1,0531	2981,3	7,698	1,011	1,309
40,0	55,94	1,0706	2992,6	7,612	1,011	1,310
50,0	68,81	1,0879	3003,8	7,546	1,012	1,311
60,0	81,29	1,1052	3015,1	7,492	1,013	1,311
70,0	93,38	1,1224	3026,3	7,446	1,013	1,312
80,0	105,13	1,1394	3037,5	7,406	1,014	1,313
90,0	116,53	1,1564	3048,7	7,371	1,014	1,313
100,0	127,62	1,1733	3059,9	7,339	1,015	1,314
120,0	148,89	1,2067	3082,1	7,285	1,016	1,315
140,0	169,07	1,2398	3104,2	7,239	1,017	1,316
160,0	188,25	1,2726	3126,2	7,199	1,018	1,317
180,0	206,52	1,3050	3148,1	7,163	1,019	1,318
200,0	223,96	1,3371	3169,9	7,132	1,020	1,319
220,0	240,64	1,3689	3191,5	7,103	1,021	1,319

Таблица 3.20. **Оксид углерода**

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
<i>T</i> = 500 К						
0,1	454,0	1,39	1,000	252,2	38,5	0,698
1,0	456,3	1,40	1,004	252,9	38,7	0,700
2,0	458,9	1,41	1,007	253,8	38,9	0,701
3,0	461,7	1,42	1,010	254,7	39,1	0,703
4,0	464,4	1,43	1,012	255,7	39,4	0,704
5,0	467,3	1,44	1,014	256,7	39,6	0,706
6,0	470,2	1,45	1,016	257,7	39,8	0,707
8,0	476,2	1,48	1,018	259,8	40,3	0,710
10,0	482,3	1,50	1,019	262,1	40,9	0,713
12,0	488,7	1,53	1,019	264,5	41,4	0,715
16,0	502,0	1,58	1,014	269,6	42,5	0,720
20,0	515,9	1,64	1,005	275,1	43,6	0,724
25,0	533,9	1,71	0,990	282,3	45,0	0,728
30,0	552,5	1,78	0,971	289,7	46,4	0,732
35,0	571,4	1,85	0,949	297,4	47,8	0,735
40,0	590,5	1,93	0,927	305,1	49,2	0,738
45,0	609,6	2,00	0,903	312,9	50,6	0,740

Оксид углерода

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
<i>T=600 K</i>						
0,1	495,3	1,38	1,000	285,9	44,5	0,698
1,0	497,7	1,38	1,001	286,5	44,7	0,699
2,0	500,3	1,39	1,001	287,2	44,9	0,700
3,0	503,1	1,40	1,001	287,8	45,1	0,700
4,0	505,8	1,41	1,002	288,6	45,3	0,701
5,0	508,6	1,42	1,001	289,3	45,5	0,702
6,0	511,4	1,43	1,001	290,1	45,7	0,702
8,0	517,1	1,45	1,000	291,7	46,1	0,704
10,0	523,0	1,47	0,998	293,4	46,5	0,705
12,0	528,9	1,49	0,995	295,2	47,0	0,706
16,0	541,1	1,53	0,987	299,0	47,9	0,708
20,0	553,7	1,58	0,978	303,1	48,8	0,710
25,0	569,7	1,63	0,964	308,6	49,9	0,713
30,0	586,0	1,68	0,947	314,3	51,1	0,715
35,0	602,6	1,74	0,930	320,2	52,3	0,716
40,0	619,2	1,79	0,912	326,2	53,5	0,718
45,0	635,9	1,85	0,893	332,3	54,6	0,719
50,0	652,6	1,90	0,874	338,5	55,8	0,721
<i>T=700 K</i>						
0,1	532,6	1,36	1,000	317,3	50,6	0,699
1,0	534,9	1,37	0,999	317,8	50,7	0,699
2,0	537,6	1,38	0,998	318,3	50,9	0,699
3,0	540,2	1,39	0,997	318,8	51,0	0,700
4,0	542,9	1,40	0,996	319,4	51,2	0,700
5,0	545,6	1,40	0,995	320,0	51,4	0,700
6,0	548,3	1,41	0,994	320,6	51,6	0,700
8,0	553,8	1,43	0,990	321,8	51,9	0,701
10,0	559,3	1,44	0,987	323,1	52,3	0,701
12,0	564,9	1,46	0,983	324,5	52,7	0,702
16,0	576,3	1,49	0,974	327,5	53,4	0,703
20,0	587,9	1,53	0,964	330,7	54,2	0,704
25,0	602,5	1,57	0,951	335,0	55,2	0,705
30,0	617,4	1,62	0,936	339,4	56,2	0,706
35,0	632,3	1,66	0,920	344,1	57,2	0,707
40,0	647,3	1,70	0,905	349,0	58,2	0,707
45,0	662,3	1,75	0,888	353,9	59,2	0,708
50,0	677,4	1,79	0,872	359,0	60,2	0,709
60,0	707,2	1,87	0,841	369,2	62,2	0,710
<i>T=800 K</i>						
0,1	567,0	1,35	1,000	347,0	56,5	0,699
1,0	569,3	1,36	0,998	347,3	56,6	0,700
2,0	571,8	1,37	0,997	347,7	56,8	0,700
3,0	574,4	1,37	0,995	348,1	56,9	0,700
4,0	577,0	1,38	0,993	348,6	57,1	0,700
5,0	579,6	1,39	0,992	349,0	57,2	0,700
6,0	582,2	1,39	0,990	349,5	57,4	0,700
8,0	587,4	1,41	0,986	350,5	57,7	0,700
10,0	592,7	1,42	0,981	351,5	58,0	0,700
12,0	598,0	1,44	0,977	352,6	58,4	0,700
16,0	608,7	1,46	0,968	355,0	59,0	0,700
20,0	619,5	1,49	0,957	357,5	59,7	0,700

Оксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
25,0	633,2	1,53	0,944	360,9	60,6	0,700
30,0	646,9	1,57	0,930	364,5	61,4	0,701
35,0	660,7	1,60	0,916	368,3	62,3	0,701
40,0	674,5	1,64	0,902	372,3	63,2	0,701
45,0	688,3	1,67	0,887	376,4	64,1	0,701
50,0	702,1	1,71	0,873	380,5	65,0	0,702
60,0	729,5	1,78	0,845	389,1	66,7	0,702
70,0	756,6	1,85	0,817	397,9	68,5	0,703
80,0	783,3	1,91	0,791	406,7	70,2	0,704

 $T=900$ K

0,1	599,2	1,34	1,000	375,1	62,3	0,700
1,0	601,4	1,35	0,998	375,4	62,4	0,700
2,0	603,8	1,35	0,996	375,7	62,6	0,700
3,0	606,3	1,36	0,994	376,0	62,7	0,700
4,0	608,8	1,37	0,992	376,4	63,8	0,700
5,0	611,3	1,37	0,990	376,7	63,0	0,700
6,0	613,8	1,38	0,988	377,1	63,1	0,700
8,0	618,8	1,39	0,983	377,9	63,4	0,699
10,0	623,9	1,40	0,979	378,7	63,7	0,699
12,0	628,9	1,42	0,974	379,6	64,0	0,699
16,0	639,1	1,44	0,964	381,5	64,6	0,699
20,0	649,3	1,47	0,954	383,5	65,2	0,698
25,0	662,1	1,50	0,941	386,3	65,9	0,698
30,0	675,0	1,53	0,928	389,2	66,7	0,698
35,0	687,9	1,56	0,915	392,4	67,5	0,697
40,0	700,7	1,59	0,902	395,6	68,3	0,697
45,0	713,6	1,62	0,888	399,0	69,1	0,697
50,0	726,4	1,65	0,875	402,5	69,9	0,697
60,0	751,9	1,71	0,849	409,8	71,5	0,697
70,0	777,2	1,77	0,824	417,3	73,0	0,697
80,0	802,1	1,83	0,800	424,9	74,6	0,698
90,0	826,7	1,88	0,778	432,7	76,1	0,698

 $T=1000$ K

0,1	629,6	1,33	1,000	402,1	68,0	0,701
1,0	631,7	1,34	0,998	402,3	68,1	0,701
5,0	641,3	1,36	0,989	403,3	68,6	0,700
10,0	653,3	1,39	0,977	404,9	69,2	0,699
20,0	677,6	1,44	0,953	408,8	70,6	0,697
30,0	701,9	1,50	0,928	413,5	71,9	0,696
40,0	726,2	1,55	0,903	418,8	73,4	0,695
50,0	750,4	1,61	0,878	424,6	74,8	0,694
60,0	774,4	1,66	0,854	430,8	76,2	0,694
70,0	798,1	1,71	0,831	437,2	77,7	0,693
80,0	821,6	1,76	0,809	443,9	79,1	0,693
90,0	844,7	1,81	0,788	450,6	80,5	0,693
100,0	867,5	1,86	0,767	457,5	81,9	0,694

 $T=1100$ K

0,1	658,6	1,33	1,000	428,0	73,4	0,701
1,0	660,6	1,33	0,998	428,1	73,5	0,701
5,0	669,9	1,35	0,989	429,0	74,0	0,700
10,0	681,4	1,38	0,977	430,2	74,6	0,699
20,0	704,6	1,43	0,953	433,4	75,8	0,697

Оксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
30,0	727,8	1,47	0,929	437,3	77,1	0,695
40,0	750,9	1,52	0,905	441,7	78,4	0,693
50,0	773,8	1,57	0,882	446,7	79,7	0,692
60,0	796,6	1,62	0,859	451,9	81,0	0,691
70,0	819,1	1,66	0,838	457,5	82,3	0,690
80,0	841,3	1,71	0,817	463,3	83,6	0,690
90,0	863,3	1,75	0,797	469,2	84,9	0,690
100,0	884,9	1,79	0,778	475,3	86,2	0,689

$T=1200\text{ K}$

0,1	686,3	1,32	1,000	453,0	78,8	0,702
1,0	688,3	1,33	0,998	453,1	78,9	0,701
5,0	697,3	1,34	0,988	453,8	79,3	0,700
10,0	708,4	1,37	0,977	454,8	79,8	0,699
20,0	730,7	1,41	0,954	457,3	80,9	0,696
30,0	752,9	1,46	0,931	460,5	82,1	0,694
40,0	774,9	1,50	0,908	464,3	83,3	0,692
50,0	796,8	1,54	0,886	468,5	84,5	0,690
60,0	818,5	1,58	0,865	473,0	85,7	0,689
70,0	840,0	1,63	0,844	477,9	86,9	0,688
80,0	861,2	1,67	0,825	482,9	88,1	0,687
90,0	882,1	1,71	0,806	488,2	89,3	0,687
100,0	902,8	1,74	0,788	493,5	90,5	0,686
120,0	943,3	1,82	0,754	504,6	92,9	0,686

$T=1300\text{ K}$

0,1	713,0	1,32	1,000	477,2	83,9	0,702
1,0	715,0	1,32	0,998	477,3	84,0	0,702
5,0	723,6	1,34	0,989	477,8	84,4	0,700
10,0	734,3	1,36	0,977	478,6	84,9	0,699
20,0	755,8	1,40	0,955	480,7	85,9	0,696
30,0	777,1	1,44	0,933	483,4	87,0	0,693
40,0	798,3	1,48	0,911	486,5	88,1	0,691
50,0	819,3	1,52	0,890	490,1	89,2	0,689
60,0	840,1	1,56	0,870	494,0	90,3	0,688
70,0	860,6	1,59	0,850	498,2	91,5	0,687
80,0	880,9	1,63	0,832	502,7	92,6	0,686
90,0	901,0	1,67	0,814	507,3	93,7	0,685
100,0	920,9	1,70	0,797	512,1	94,8	0,684
120,0	959,7	1,77	0,765	522,0	97,0	0,683

$T=1400\text{ K}$

0,1	738,8	1,31	1,000	500,8	88,9	0,702
1,0	740,7	1,32	0,998	500,9	89,0	0,702
5,0	749,0	1,33	0,989	501,2	89,4	0,700
10,0	759,4	1,35	0,978	501,8	89,8	0,699
20,0	780,1	1,39	0,956	503,5	90,8	0,696
30,0	800,7	1,43	0,935	505,7	91,8	0,693
40,0	821,1	1,46	0,914	508,4	92,8	0,691
50,0	841,3	1,50	0,894	511,5	93,9	0,689
60,0	861,3	1,53	0,875	514,9	94,9	0,687
70,0	881,0	1,57	0,856	518,5	95,9	0,686
80,0	900,6	1,60	0,839	522,4	97,0	0,684
90,0	919,9	1,64	0,821	526,5	98,1	0,683
100,0	939,0	1,67	0,805	530,8	99,1	0,682

Оксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
120,0	976,5	1,73	0,774	539,7	101,2	0,681
140,0	1013,0	1,79	0,746	548,9	103,2	0,680
$T=1500\text{ K}$						
0,1	763,7	1,31	1,000	523,7	93,8	0,702
1,0	765,5	1,31	0,998	523,8	93,9	0,702
5,0	773,6	1,33	0,989	524,0	94,2	0,700
10,0	783,7	1,34	0,978	524,5	94,6	0,699
20,0	803,7	1,38	0,957	525,8	95,5	0,696
30,0	823,6	1,41	0,937	527,7	96,5	0,693
40,0	843,3	1,45	0,917	529,9	97,4	0,690
50,0	862,8	1,48	0,898	532,6	98,4	0,688
60,0	882,1	1,51	0,880	535,5	99,4	0,686
70,0	901,2	1,55	0,862	538,7	100,4	0,685
80,0	920,0	1,58	0,845	542,1	101,3	0,683
90,0	938,7	1,61	0,829	545,8	102,3	0,682
100,0	957,1	1,64	0,813	549,6	103,3	0,681
120,0	993,3	1,70	0,783	557,6	105,3	0,680
140,0	1028,6	1,76	0,756	565,9	107,2	0,679
$T=1750\text{ K}$						
0,1	822,7	1,30	1,000	578,7	105,4	0,702
1,0	824,4	1,31	0,998	578,7	105,4	0,702
5,0	832,0	1,32	0,990	578,8	105,7	0,700
10,0	841,3	1,33	0,980	578,9	106,1	0,699
20,0	859,9	1,36	0,961	579,7	106,9	0,695
30,0	878,4	1,39	0,942	580,8	107,7	0,693
40,0	896,6	1,42	0,925	582,3	108,5	0,690
50,0	914,6	1,45	0,907	584,0	109,4	0,688
60,0	932,5	1,48	0,891	586,1	110,2	0,686
70,0	950,2	1,50	0,875	588,4	111,1	0,684
80,0	967,6	1,53	0,859	590,9	111,9	0,682
90,0	984,9	1,56	0,845	593,6	112,8	0,681
100,0	1002,0	1,58	0,830	596,5	113,6	0,679
120,0	1035,5	1,63	0,804	602,7	115,4	0,677
140,0	1068,4	1,68	0,779	609,3	117,1	0,676
160,0	1100,4	1,73	0,755	616,2	118,8	0,674
180,0	1131,8	1,78	0,734	623,4	120,5	0,673
$T=2000\text{ K}$						
0,1	877,9	1,30	1,000	630,9	116,3	0,702
1,0	879,5	1,30	0,998	630,8	116,4	0,702
5,0	886,6	1,31	0,991	630,8	116,6	0,700
10,0	895,3	1,32	0,982	630,8	117,0	0,699
20,0	912,8	1,35	0,964	631,0	117,7	0,696
30,0	930,0	1,38	0,947	631,7	118,4	0,693
40,0	947,1	1,40	0,931	632,6	119,1	0,690
50,0	964,0	1,43	0,915	633,8	119,8	0,688
60,0	980,7	1,45	0,900	635,2	120,6	0,686
70,0	997,2	1,47	0,886	636,9	121,3	0,684
80,0	1013,6	1,50	0,872	638,8	122,1	0,682
90,0	1029,8	1,52	0,858	640,8	122,8	0,680
100,0	1045,8	1,54	0,845	643,0	123,6	0,679
120,0	1077,3	1,59	0,820	647,8	125,1	0,676

Оксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
140,0	1108,1	1,63	0,797	653,0	126,7	0,674
160,0	1138,3	1,67	0,776	658,6	128,2	0,673
180,0	1167,9	1,71	0,756	664,4	129,7	0,671
200,0	1196,8	1,75	0,737	670,6	131,2	0,670

$T = 2250 \text{ K}$

0,1	929,9	1,29	1,000	680,7	126,7	0,702
1,0	931,4	1,30	0,998	680,6	126,7	0,701
5,0	938,0	1,31	0,992	680,5	127,0	0,700
10,0	946,3	1,32	0,983	680,3	127,3	0,699
20,0	962,8	1,34	0,967	680,3	127,9	0,696
30,0	979,1	1,36	0,952	680,6	128,5	0,693
40,0	995,2	1,39	0,937	681,2	129,2	0,691
50,0	1011,1	1,41	0,922	681,9	129,8	0,688
60,0	1026,9	1,43	0,909	682,9	130,5	0,686
70,0	1042,5	1,45	0,895	684,1	131,2	0,684
80,0	1057,9	1,47	0,882	685,5	131,9	0,682
90,0	1073,2	1,49	0,870	687,0	132,5	0,681
100,0	1088,3	1,51	0,858	688,7	133,2	0,679
120,0	1118,1	1,55	0,835	692,4	134,6	0,677
140,0	1147,3	1,59	0,814	696,5	136,0	0,674
160,0	1175,9	1,63	0,793	701,0	137,3	0,672
180,0	1204,0	1,66	0,775	705,9	138,7	0,671
200,0	1231,6	1,70	0,757	710,9	140,1	0,669
220,0	1258,6	1,73	0,740	716,2	141,4	0,668

Раздел четвертый

Водяной пар

4.1. Уравнение состояния водяного пара

Построение теоретически обоснованного уравнения состояния водяного пара связано с большими трудностями, обусловленными сложной структурой трехатомной молекулы водяного пара, наличием у нее дипольного, квадрупольного и других моментов, что существенно усложняет потенциал межмолекулярного взаимодействия.

Вследствие того что глубина потенциальной ямы для водяного пара очень велика, область экспериментального исследования свойств водяного пара приходится на относительно низкие приведенные температуры ($T^* < 2$). Именно при низких приведенных температурах особенно велики вклады в вириальные коэффициенты, обусловленные наличием диполь-дипольного и диполь-квадрупольного взаимодействия. И именно при низких приведенных температурах существенна поправка в третьем вириальном коэффициенте за счет неаддитивности энергии взаимодействия. В качестве модельного потенциала водяного

пара используется потенциал, представляющий собой суперпозицию сферически-симметричного потенциала Леннарда-Джонса (12-6) и средней энергии диполь-дипольного взаимодействия:

$$u(r, T) = 4\epsilon_0 \left[\left(\frac{\sigma_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_0}{r} \right)^6 \right] - \frac{2\mu_*^4}{3kT r^6}, \quad (4.1)$$

где μ_* — дипольный момент молекулы.

Потенциал (4.1) называют предварительно усредненным потенциалом. Потенциальная функция (4.1) может быть приведена к виду потенциала Леннарда-Джонса (12-6), в котором параметры потенциала ϵ/k и b_0 зависят от температуры, т. е.

$$u(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (4.2)$$

где

$$\epsilon = \epsilon_0 \left[1 + \frac{y}{T_0^*} \right]^2; \quad (4.3)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \frac{y}{T_0^*} \right]^{-1/6}, \quad (4.4)$$

причем

$$y = 1/6 \frac{\mu_*^4}{\epsilon_0^2 \sigma_0^6} \quad (4.5)$$

и

$$T_0^* = kT/\epsilon_0. \quad (4.6)$$

Представление потенциальной функции в виде выражения (4.2) позволяет использовать вириальные коэффициенты, рассчитанные для модельного потенциала Леннарда-Джонса (12-6).

Энергия диполь-квадрупольного взаимодействия в настоящей модели не учитывается. Это может привести к некоторой погрешности, в основном при низкой температуре.

Введение энергии диполь-квадрупольного взаимодействия, которая пропорциональна r^{-8} , в потенциальную функцию не позволило бы ее преобразовать к виду потенциала Леннарда-Джонса (12-6) и, следовательно, воспользоваться табулированными значениями вириальных коэффициентов.

В настоящей работе признано целесообразным отказаться от исследования слишком низких температур для водяного пара; в области низких температур имеется большое количество экспериментальных данных, и свойства водяного пара могут быть рассчитаны с помощью эмпирических уравнений состояния. Здесь же ставится задача расчета при высоких температурах (задача экстраполяции).

Выбранная потенциальная функция (4.1) содержит три параметра: σ_0 , ϵ_0 и μ_* , причем σ_0 и ϵ_0 являются соответствующими параметрами обычного потенциала Леннарда-Джонса (12-6) при $T \rightarrow \infty$.

Уравнение состояния водяного пара записывается в обычном виде вириального разложения (1.3) с использованием первых пяти вириальных коэффициентов. Однако вследствие зависимости параметров потенциала от температуры уравнение состояния является более сложным, чем использовавшееся в предыдущих главах. В этом уравнении, если учесть (4.2)—(4.6),

$$b_0 = b_0^0 \left[1 + \frac{y}{T_0^*} \right]^{-1/2} = b_0^0 \left[1 + \frac{2}{27} \frac{\pi^2 N^2 \mu_*^4}{k^2 \frac{\epsilon_0}{k} (b_0^0)^2 T} \right]^{-1/2}, \quad (4.7)$$

где $b_0^0 = \frac{2}{3} \pi \sigma_0^3 N$;

$$\epsilon/k = \frac{\epsilon_0}{k} \left[1 + \frac{y}{T_0^*} \right]^2 = \frac{\epsilon_0}{k} \left[1 + \frac{2}{27} \frac{\pi^2 N^2 \mu_*^4}{k^2 \frac{\epsilon_0}{k} (b_0^0)^2 T} \right]^2. \quad (4.8)$$

Таким образом, уравнение состояния водяного пара вида (1.3) содержит три неизвестные константы: ϵ_0/k , b_0^0 и μ_* , причем b_0^0 (σ_0) и ϵ_0/k определяются в соответствии с методикой, изложенной в первой главе, используемой при обработке экспериментальных данных с помощью потенциала Леннарда-Джонса (12-6).

Для реализации этой методики по данным [1 и 5] произведена аппроксимация приведенных вириальных коэффициентов полиномами вида (2.1), (2.2) и т. д. в интервалах приведенных температур 0,5—7,0; 0,625—7,0; 0,75—7,0 соответственно для B^* , D^* и E^* .

Хотя приведенные вириальные коэффициенты представлены в виде достаточно простых функций, получившиеся зависимости являются сложными по отношению к параметрам потенциала, так как аргумент $1/T^*$ связан с переменной величиной соотношением

$$\frac{1}{T^*} = \frac{\epsilon/k}{T} = \frac{\epsilon_0/k}{T} \left[1 + \frac{\mu_*^4}{6\epsilon_0 \sigma_0^6 k T} \right]^2, \quad (4.9)$$

или

$$\frac{1}{T^*} = \frac{\epsilon/k}{T} = \frac{\epsilon_0/k}{T} \left[1 + \frac{2}{27} \frac{\pi^2 N^2 \mu_*^4}{k^2 \frac{\epsilon_0}{k} (b_0^0)^2 T} \right]^2. \quad (4.10)$$

Для приведенного третьего вириального коэффициента C^* рассчитан вклад от неаддитивности энергии взаимодействия.

Расчет поправки на неаддитивность ΔC_n^* производился в соответствии с теоретическими представлениями [15], т. е. использовалось уравнение (1.14), и при этом учитывалась зависимость параметров потенциала от температуры (4.3) и (4.4).

Так как для конкретного расчета неаддитивных вкладов ΔC_n^* необходимы величины ϵ_0 , σ_0 и μ_* , которые определяются из решения общей задачи, из p/T -данных, то расчет ΔC_n^* производился в процессе последовательного приближения. При этом каждый раз выполнялась аппроксимация третьего вириального коэффициента в виде функции приведенной температуры. В ходе таких расчетов выяснились следующие закономерности.

Неаддитивный вклад в третий вириальный коэффициент для водяного пара оказался большим. При $T^* \approx 1$ он составляет около 100% аддитивной части.

Использование модели Гаусса и модели искажения для вклада в ΔC_n^* от сил отталкивания не приводит к заметным расхождениям в суммарной поправке ΔC_n^* ; в дальнейшем для расчетов использовалась лишь модель искажения.

Различные приближения, где в достаточно широких пределах варьировались величины σ_0 (b_0^0) и ϵ_0/k (дипольный момент μ_* в процессе расчета мало изменялся), не приводили к значительным изменениям вклада ΔC_n^* ; по крайней мере неаддитивный приведенный третий вириальный коэффициент в пределах точности его расчета практически не изменился.

Поправка на неаддитивность в третьем вириальном коэффициенте с ростом температуры уменьшается. Результаты расчетов представлены на рис. 4.1.

С помощью данных о сжимаемости определены три неизвестные константы: ϵ_0/k , b_0^0 и μ_* . Для определения констант были использованы значения удельных объемов водяного пара в области, которая является характерной для исследования ее с помощью вириального уравнения состояния (рис. 4.2). В качестве исходных данных были использованы 164 значения удельных объемов из международных скелетных таблиц 1963 г. [134] и экспериментальные данные [135 и 136].

Полученное уравнение состояния описывает значение удельных объемов в области, указанной на рис. 4.2, со средней квадратической погрешностью 0,07%, что соответствует погрешности принятых к обработке данных.

Определены три константы уравнения, связанные с параметрами потенциала. Их значения следующие: $\epsilon_0/k = 288,097994$ К; $b_0 = 1,89329500 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\mu_* = 1,72883508D^*$.

Константы аппроксимации приведенных вириальных коэффициентов равны (третий вириальный коэффициент неаддитивный):

$a_0 = 0,599149141$	$c_0 = 0,193596506$
$a_1 = -0,691473629$	$c_1 = 1,40326526$
$a_2 = -8,39099593$	$c_2 = -5,89897987$
$a_3 = 20,6252913$	$c_3 = 18,2573037$
$a_4 = -36,6271635$	$c_4 = -26,4678627$
$a_5 = 42,1921628$	$c_5 = 23,8978153$
$a_6 = -31,2862494$	$c_6 = -13,8526160$
$a_7 = 14,2911865$	$c_7 = 4,32714315$
$a_8 = -3,64597613$	$c_8 = -0,635892879$
$a_9 = 0,396345407$	
$d_0 = 0,00627240901$	$e_0 = -0,844759355$
$d_1 = 1,98980916$	$e_1 = 15,9590766$
$d_2 = -12,6189800$	$e_2 = -108,295331$
$d_3 = 46,2769040$	$e_3 = 369,941916$
$d_4 = -116,759341$	$e_4 = -677,677195$
$d_5 = 194,064619$	$e_5 = 628,281990$
$d_6 = -191,704442$	$e_6 = -229,928318$
$d_7 = 105,851342$	
$d_8 = -27,3812054$	

Полученное уравнение состояния, основанное на применении предварительно усредненного потенциала, достаточно хорошо описывает свойства водяного пара. Интервал температур от 573 до 1173 К, в котором использовались значения удельных объемов для определения параметров потенциала, соответствует приведенным температурам от 0,73 до 2,35. Распространить уравнение состояния в область температур ниже 573 К, очевидно, нецелесообразно как с точки зрения увеличивающегося при низких температурах влияния диполь-квadrupольного взаимодействия, которое не учитывается в принятой модели потенциала, так и потому, что нижняя граница аппроксимации вириальных коэффициентов при 573 К находится уже на пределе. Кроме того, при низких приведенных температурах будут заметны квантовые поправки в вириальных коэффициентах; учет этого обстоятельства не предусматривался при выполнении настоящей работы.

В связи с тем что уравнение состояния ориентируется на расчет термодинамических свойств при высоких температурах (задача экстраполяции), произведено исследование того, насколько меняются параметры потенциала (константы уравнения) в зависимости от области параметров, в которой используются значения удельных объемов для определения констант потенциала.

* $1D = 3,33564 \cdot 10^{-30}$ кл·м.

Рис. 4.1. Неаддитивный приведенный третий вириальный коэффициент водяного пара

На рис. 4.3 схематично показаны четыре подобласти, данные из которых использовались для определения параметров потенциала. Подобласти I и II в сумме идентичны области, указанной на рис. 4.2, из которой получено приведенное выше уравнение состояния.

Тем же методом, что и ранее, получены еще три уравнения состояния, точнее, определены еще три совокупности констант уравнения состояния. Результаты этой работы сведены в табл. 4.1, где указаны подобласти использования pvT -данных (рис. 4.3) и средняя квадратическая погрешность аппроксимации фактора сжимаемости. В первой строке таблицы для сравнения приведены уже полученные ранее параметры.

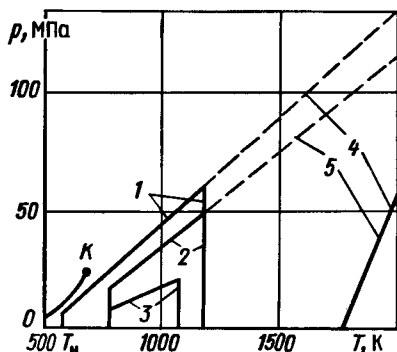


Рис. 4.2. Границы экспериментальных данных о сжимаемости (1), вязкости (2) и теплопроводности (3) водяного пара, используемых при обработке; границы параметров, для которых возможна экстраполяция по уравнению состояния (4) и уравнению вязкости (5)

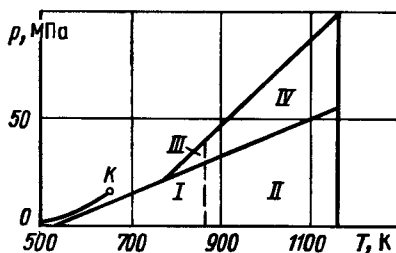
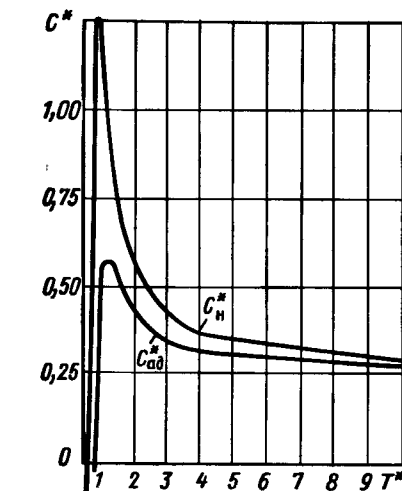


Рис. 4.3. Области обработки pvT -данных водяного пара

Таблица 4.1. Параметры уравнения состояния, определенные из различных подобластей pvT -данных водяного пара

Вариант уравнения	Подобласти использования pvT -данных	ϵ_0/k , К	$b_0^0 \cdot 10^3$, м ³ /кг	σ_0 , Å	μ_* , D	δz , %
1	I+II	288,10	1,8983	3,0015	1,7288	0,070
2	II	289,47	1,8682	2,9882	1,7194	0,060
3	I+II+ +III+IV	286,88	1,9061	3,0083	1,7329	0,087
4	II+IV	287,44	1,8894	2,9998	1,7260	0,090

Из табл. 4.1 следует, что определение параметров потенциала отличается достаточной устойчивостью. Необходимо заметить, что на результаты определения параметров оказали влияние также и систематические ошибки экспериментальных и табличных значений.

Приведенные в табл. 4.1 данные по четырем вариантам уравнения состояния показывают, что значительное расширение области действия уравнения не привело к существенному ухудшению точности аппроксимации табличных и экспериментальных данных. В первых двух вариантах уравнения состояния максимальное давление при 1173 К было около 90 МПа, а в последних двух около 100 МПа, при этом средняя квадратическая погрешность описания фактора сжимаемости не превышает 0,09%.

4.2. Совместная обработка экспериментальных данных о сжимаемости, вязкости и теплопроводности.

Расчет таблиц теплофизических свойств водяного пара

Наряду с указанными выше получены единые константы ϵ_0/k , b_0 и μ , для уравнений сжимаемости, вязкости и теплопроводности водяного пара низкой и умеренной плотности. Использование в качестве модельного предварительно осредненного потенциала водяного пара, приведенного к виду потенциала Леннарда-Джонса (12-6) с перенесенными параметрами, позволяет применять в расчетах наряду с равновесными также неравновесные вириальные коэффициенты и интегралы столкновений, полученные для потенциала Леннарда-Джонса (12-6). Энергия диполь-квадрупольного взаимодействия в потенциале не учитывается. Это может привести к некоторой погрешности, в основном при низких температурах, причем влияние такого взаимодействия на равновесные и неравновесные свойства различно. В связи с этим в процессе составления уравнения для каждого исследуемого теплофизического свойства определена нижняя граница температурной области, начиная с которой потенциал (4.1) достаточно точно отображает поведение этого свойства. Так, равновесные свойства отображаются достаточно точно уравнением состояния водяного пара, начиная с температуры 573 К.

Уравнение вязкости водяного пара при атмосферном давлении получено в виде уравнения Энскога (1.24). Табличные значения интегралов столкновений для потенциала Леннарда-Джонса (12-6) [1] аппроксимированы при $T^* = 0,7 \div 10$ полиномом вида $f_\eta / \Omega^{(2.2)*} = \sum_{i=0} g_i (\epsilon / (kT))^i$. Константы полинома приводятся ниже.

Предварительные расчеты по определению констант усредненного потенциала из опытных данных о вязкости водяного пара, полученных Латто [137] и Шифриным [138] при атмосферном давлении, показали, что при $T_n = 773,15$ К константы становятся близкими к соответствующим значениям, полученным из данных о сжимаемости.

Уравнение вязкости умеренной плотности найдено в виде вязкостного вириального уравнения (1.43). Аппроксимация интегралов столкновения приводится ниже. Температурная функция второго вязкостного вириального коэффициента $B_\eta^*(T^*)$, полученная по модели, предложенной в [19], наилучшим образом соответствует экспериментальным данным для водяного пара. Поэтому при составлении уравнения вязкости водяного пара умеренной плотности используются значения $B_\eta^*(T^*)$, полученные в [19]. Значения третьего вязкостного вириального коэффициента взяты из [21]. Полученные предварительно значения параметров потенциала позволяют рассчитать, что $T_n = 773$ К соответствует $T^* \approx 1,1$, т. е. в расчетах можно использовать функции, аппроксимирующие $B_\eta^*(T^*)$ и $C_\eta^*(T^*)$, полученные для азота (§ 3.1).

В процессе обработки использованы 65 опытных точек о вязкости при повышенных давлениях [139–142], начиная с $T_n = 773$ К. Области параметров экспериментальных данных, используемых в обработке, изображены на рис. 4.2.

Решение задачи составления уравнения теплопроводности водяного пар имеет свои особенности, которые ее значительно осложняют. Во-первых, опытные данные теплопроводности водяного пара низкой и особенно умеренной плотности получены с большой погрешностью, существенно превышающей погрешности при определении сжимаемости и вязкости. Поэтому только при совместной обработке с более точными данными о сжимаемости и вязкости можно рассчитать неизвестные параметры.

Во-вторых, при составлении уравнения теплопроводности возникает необходимость определять не три неизвестные константы, а четыре. Дополнительный неизвестный параметр $\bar{b}$ появляется при расчете функции $\beta_0(T)$ (§ 1.5).

Подробно метод нахождения четырех параметров ϵ_0/k , h_0^0 , μ_* и $\bar{b}$ при совместной обработке данных о сжимаемости, вязкости и теплопроводности водяного пара изложен в [19].

Уравнение для теплопроводности водяного пара низкой плотности найдено в виде уравнения по теории Мейсона и Мончика (1.27). Значения функции $\beta_0(T)$ для водяного пара определены из условия наилучшего описания экспериментальных данных, например [19], и аппроксимированы полиномом $\beta_0(T) =$

$$= \sum_{i=0}^6 m_i (T/1000)^i. \text{ В процессе обработки использовано 30 опытных точек}$$

теплопроводности водяного пара при атмосферном давлении, полученных Варгафтиком с соавторами [143–145], Брайном [146] и Бури [147] в диапазоне температур 773–1170 К. Относительная погрешность опытных данных о теплопроводности принята равной 3%.

Уравнение теплопроводности водяного пара при повышенном давлении представлено в виде вириального уравнения (1.44). Значения второго теплопроводностного вириального коэффициента водяного пара получены в [19] и

$$\text{аппроксимированы полиномом вида } B_2^* = \sum_{j=0}^8 p_j (1/T^*)^j. \text{ При расчете использо-}$$

вался третий теплопроводностный вириальный коэффициент Кертисса [22], но из-за неопределенности вклада за счет многоатомности в $C_\lambda(T)$ область давлений опытных данных теплопроводности водяного пара уменьшена в 2 раза по сравнению с областью давлений данных вязкости (рис. 4.2).

К обработке приняты 35 опытных точек о теплопроводности водяного пара при повышенных давлениях: Цедерберга с соавторами [148], Варгафтика и Тарзиманова [149] и Бури [147].

Относительные погрешности опытных данных о сжимаемости, вязкости и теплопроводности приняты соответственно равными 0,1; 1 и 3%. Общее количество обработанных экспериментальных точек $n=373$.

В результате совместной обработки этих точек получены константы усредненного потенциала и параметр $\bar{b}$.

Средние квадратические погрешности аппроксимации опытных данных об исследуемых свойствах водяного пара составили, %:

$$\delta_z = 0,078; \delta_\eta = 1,525; \delta_{\eta_0} = 1,166; \delta_{\eta^{*n}} = 1,858; \delta_\lambda = 6,102; \delta_{\lambda_0} = 1,663; \delta_{\lambda^{*n}} = 8,355.$$

Полученные согласованные, теоретически обоснованные уравнения сжимаемости, вязкости и теплопроводности и единые параметры модельного потенциала межмолекулярного взаимодействия водяного пара использованы для расчета таблиц термодинамических свойств. В качестве нижней границы температурного интервала при расчете таблиц выбрана $T_n = 773$ К — температура, начиная с которой усредненный потенциал способен отобразить неравновесные свойства водяного пара; в качестве верхней границы выбрана $T_n = 2000$ К, причем с температуры выше 1773 К данные при низких давлениях не приводятся, так как начинает сказываться разложение молекул водяного пара. Область давлений представлена на рис. 4.2.

Для расчета равновесных свойств использованы константы полиномов, аппроксимирующих вириальные коэффициенты, приведенные в § 4.1, а также полином, аппроксимирующий интегралы столкновения, приведенный в § 1.5.

Ниже приводятся константы полиномов, аппроксимирующих функцию $\beta_0(T)$, а также вязкостные и теплопроводностные вириальные коэффициенты, использовавшиеся для расчета неравновесных свойств:

$$\begin{aligned}
 g_0 &= 1,38086739 \cdot 10^0 & m_0 &= 7,76896838 \cdot 10^{-1} \\
 g_1 &= -1,99209241 \cdot 10^0 & m_1 &= 1,18166234 \cdot 10^0 \\
 g_2 &= 3,40227706 \cdot 10^0 & m_2 &= -1,67004674 \cdot 10^0 \\
 g_3 &= -4,64476227 \cdot 10^0 & m_3 &= 2,26128807 \cdot 10^0 \\
 g_4 &= 4,03253854 \cdot 10^0 & m_4 &= -1,46149747 \cdot 10^0 \\
 g_5 &= -2,03620013 \cdot 10^0 & m_5 &= 4,42329366 \cdot 10^{-1} \\
 g_6 &= 5,43981336 \cdot 10^{-1} & m_6 &= -5,13612182 \cdot 10^{-2} \\
 g_7 &= -5,92716845 \cdot 10^{-2} \\
 k_0 &= -1,12163980 \cdot 10^{-1} & l_0 &= 1,11630384 \cdot 10^{-1} \\
 k_1 &= 2,41297777 \cdot 10^0 & l_1 &= 2,61744178 \cdot 10^0 \\
 k_2 &= -6,42755520 \cdot 10^0 & l_2 &= -8,85542243 \cdot 10^0 \\
 k_3 &= 1,27708960 \cdot 10^1 & l_3 &= 2,76504293 \cdot 10^1 \\
 k_4 &= 5,15692179 \cdot 10^{-1} & l_4 &= -5,32729030 \cdot 10^1 \\
 k_5 &= -4,27187176 \cdot 10^1 & l_5 &= 6,19913881 \cdot 10^1 \\
 k_6 &= 5,89909004 \cdot 10^1 & l_6 &= -4,18509033 \cdot 10^1 \\
 k_7 &= -3,27003963 \cdot 10^1 & l_7 &= 1,51006271 \cdot 10^1 \\
 k_8 &= 6,72701056 \cdot 10^0 & l_8 &= -2,24999009 \cdot 10^0 \\
 p_0 &= 4,12666943 \cdot 10^{-2} & q_0 &= 6,07925253 \cdot 10^{-2} \\
 p_1 &= 7,17719996 \cdot 10^{-1} & q_1 &= 5,16638081 \cdot 10^0 \\
 p_2 &= 4,79541537 \cdot 10^0 & q_2 &= -4,91980976 \cdot 10^1 \\
 p_3 &= -3,01193191 \cdot 10^1 & q_3 &= 3,43574366 \cdot 10^2 \\
 p_4 &= 1,09304939 \cdot 10^2 & q_4 &= -1,35325038 \cdot 10^3 \\
 p_5 &= -1,96460568 \cdot 10^2 & q_5 &= 3,05208470 \cdot 10^3 \\
 p_6 &= 1,82280746 \cdot 10^2 & q_6 &= -3,91534415 \cdot 10^3 \\
 p_7 &= -8,47585436 \cdot 10^1 & q_7 &= 2,65602239 \cdot 10^3 \\
 p_8 &= 1,56900955 \cdot 10^1 & q_8 &= -7,39460505 \cdot 10^2
 \end{aligned}$$

Идеально-газовые функции водяного пара представлены от 270 до 3000 К. За начало отсчета энтальпии и энтропии принято состояние воды в тройной точке ($T=273,16$ К). Аппроксимирующие полиномы имеют следующий вид:

$$h^0/(RT) = \sum_{j=0}^8 \alpha_j \tau^j; \quad c_p^0/R = \sum_{j=0}^8 \beta_j \tau^j; \quad s^0/R = \sum_{j=0}^8 \gamma_j \tau^j,$$

где $\tau=1000/T$;

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 &= 7,55356231 \cdot 10^0 & \beta_0 &= 7,73152882 \cdot 10^0 & \gamma_0 &= 3,67516761 \cdot 10^1 \\
 \alpha_1 &= -5,18146664 \cdot 10^0 & \beta_1 &= -1,50402530 \cdot 10^0 & \gamma_1 &= -4,49765201 \cdot 10^1 \\
 \alpha_2 &= 1,28408103 \cdot 10^1 & \beta_2 &= -7,88593898 \cdot 10^0 & \gamma_2 &= 5,90344056 \cdot 10^1 \\
 \alpha_3 &= -1,07610055 \cdot 10^1 & \beta_3 &= 1,32288178 \cdot 10^1 & \gamma_3 &= -4,96954936 \cdot 10^1 \\
 \alpha_4 &= 5,86752733 \cdot 10^0 & \beta_4 &= -9,87167878 \cdot 10^0 & \gamma_4 &= 2,65619456 \cdot 10^1 \\
 \alpha_5 &= -2,07672895 \cdot 10^0 & \beta_5 &= 4,14084077 \cdot 10^0 & \gamma_5 &= -8,97052104 \cdot 10^0 \\
 \alpha_6 &= 4,58805252 \cdot 10^{-1} & \beta_6 &= -1,00695852 \cdot 10^0 & \gamma_6 &= 1,85054605 \cdot 10^0 \\
 \alpha_7 &= -5,73384188 \cdot 10^{-2} & \beta_7 &= 1,32748328 \cdot 10^{-1} & \gamma_7 &= -2,12526302 \cdot 10^{-1} \\
 \alpha_8 &= 3,08859089 \cdot 10^{-3} & \beta_8 &= -7,35086963 \cdot 10^{-3} & \gamma_8 &= 1,04008518 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

При расчете таблиц использовались следующие физические константы водяного пара:

масса моля $\mu=18,015$ г/моль;

газовая постоянная $R=0,46151$ Дж/(г·К);

единицы параметров усредненного потенциала: $\epsilon_0/k=(277,864021 \pm 1,785)$ К; $b_0^0=(1,78945674 \pm 0,0045) \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\bar{h}=1,99 \pm 0,09$; $\mu_*= (1,71147905 \pm 0,0029)$ Д.

Результаты расчета теплофизических свойств водяного пара приведены в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 Водяной пар

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=800$ К						
0,1	0,27	0,9993	3545,4	8,908	1,686	2,150
1,0	2,73	0,9933	3536,6	7,837	1,699	2,179
2,0	5,49	0,9865	3526,8	7,508	1,713	2,212
3,0	8,29	0,9797	3516,8	7,312	1,727	2,247
4,0	11,14	0,9728	3506,7	7,170	1,742	2,283
5,0	14,02	0,9658	3496,4	7,057	1,757	2,320
6,0	16,95	0,9588	3486,1	6,963	1,772	2,359
8,0	22,94	0,9445	3464,9	6,810	1,803	2,440
10,0	29,13	0,9300	3443,2	6,686	1,835	2,528
12,0	35,52	0,9151	3420,9	6,581	1,869	2,624
16,0	49,00	0,8844	3374,2	6,403	1,940	2,843
$T=900$ К						
0,1	0,24	0,9996	3764,3	9,164	1,756	2,219
1,0	2,42	0,9958	3757,9	8,096	1,763	2,237
2,0	4,86	0,9916	3750,6	7,770	1,771	2,258
3,0	7,31	0,9874	3743,3	7,577	1,780	2,279
4,0	9,79	0,9832	3736,0	7,438	1,788	2,300
5,0	12,30	0,9790	3728,6	7,329	1,796	2,322
6,0	14,82	0,9748	3721,2	7,238	1,804	2,345
8,0	19,93	0,9662	3706,2	7,093	1,821	2,391
10,0	25,14	0,9577	3691,0	6,977	1,838	2,439
12,0	30,44	0,9491	3675,6	6,879	1,856	2,490
16,0	41,35	0,9316	3644,3	6,720	1,891	2,597
20,0	52,68	0,9140	3612,0	6,589	1,928	2,715
25,0	67,49	0,8918	3570,4	6,449	1,976	2,878
$T=1000$ К						
0,1	0,22	0,9997	3990,2	9,399	1,827	2,290
1,0	2,17	0,9974	3985,3	8,333	1,832	2,302
5,0	10,98	0,9868	3963,0	7,572	1,852	2,359
10,0	22,25	0,9736	3934,8	7,230	1,878	2,434
20,0	45,74	0,9475	3877,0	6,865	1,932	2,598
30,0	70,51	0,9219	3817,6	6,630	1,986	2,784
$T=1100$ К						
0,1	0,20	0,9998	4223,1	9,618	1,898	2,360
1,0	1,97	0,9983	4219,2	8,553	1,901	2,369
5,0	9,93	0,9917	4201,7	7,797	1,914	2,409
10,0	20,03	0,9835	4179,7	7,461	1,932	2,461
20,0	40,71	0,9677	4135,4	7,108	1,967	2,571
30,0	62,03	0,9526	4090,7	6,888	2,002	2,688
40,0	83,96	0,9385	4045,8	6,722	2,037	2,813
$T=1200$ К						
0,1	0,18	0,9999	4462,8	9,825	1,996	2,428
1,0	1,81	0,9990	4459,6	8,760	1,968	2,434
5,0	9,07	0,9949	4445,6	8,007	1,978	2,464

Водяной пар

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
10,0	18,24	0,9900	4428,0	7,675	1,990	2,502
20,0	36,82	0,9807	4393,0	7,331	2,015	2,581
30,0	55,72	0,9721	4358,1	7,119	2,039	2,662
40,0	74,89	0,9644	4323,6	6,961	2,063	2,746
50,0	94,29	0,9575	4289,4	6,834	2,087	2,832

T=1300 K

0,1	0,17	0,9999	4709,0	10,021	2,031	2,493
1,0	1,67	0,9994	4706,4	8,957	2,033	2,498
5,0	8,36	0,9971	4695,0	8,206	2,040	2,521
10,0	16,76	0,9944	4680,8	7,877	2,049	2,550
20,0	33,69	0,9894	4652,6	7,538	2,067	2,609
30,0	50,76	0,9851	4624,7	7,331	2,085	2,669
40,0	67,93	0,9814	4597,2	7,180	2,102	2,730
50,0	85,17	0,9785	4570,3	7,058	2,120	2,791
60,0	102,43	0,9763	4543,9	6,956	2,137	2,852

T=1400 K

0,1	0,15	1,0000	4961,4	10,209	2,092	2,554
1,0	1,55	0,9997	4959,3	9,145	2,094	2,558
5,0	7,75	0,9987	4949,9	8,396	2,099	2,576
10,0	15,52	0,9975	4938,3	8,068	2,106	2,599
20,0	31,10	0,9955	4915,3	7,733	2,120	2,645
30,0	46,71	0,9940	4892,7	7,530	2,134	2,691
40,0	62,34	0,9931	4870,5	7,383	2,147	2,737
50,0	77,95	0,9928	4848,9	7,265	2,160	2,783
60,0	93,51	0,9930	4827,8	7,166	2,173	2,829
70,0	109,01	0,9939	4807,3	7,081	2,185	2,874

T=1500 K

0,1	0,14	1,0000	5219,8	10,388	2,150	2,612
1,0	1,44	0,9999	5218,0	9,324	2,151	2,615
5,0	7,22	0,9998	5210,3	8,577	2,155	2,630
10,0	14,45	0,9997	5200,7	8,250	2,161	2,648
20,0	28,90	0,9997	5181,8	7,918	2,172	2,685
30,0	43,32	1,0003	5163,3	7,718	2,182	2,721
40,0	57,71	1,0013	5145,2	7,574	2,193	2,758
50,0	72,03	1,0027	5127,7	7,459	2,203	2,794
60,0	86,27	1,0047	5110,6	7,363	2,213	2,829
70,0	100,41	1,0070	5094,0	7,280	2,223	2,864

T=1600 K

0,1	0,14	1,0000	5483,6	10,560	2,203	2,665
1,0	1,35	1,0001	5482,2	9,497	2,204	2,668
5,0	6,77	1,0006	5475,8	8,750	2,208	2,680
10,0	13,35	1,0012	5467,8	8,425	2,212	2,695
20,0	27,01	1,0028	5452,2	8,094	2,221	2,725
30,0	40,43	1,0048	5437,1	7,897	2,230	2,755

Водяной пар

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
40,0	53,79	1,0071	5422,3	7,754	2,238	2,784
50,0	67,05	1,0098	5407,9	7,641	2,247	2,813
60,0	80,22	1,0129	5394,1	7,548	2,255	2,842
70,0	93,27	1,0163	5380,6	7,467	2,263	2,870
80,0	106,20	1,0201	5367,6	7,396	2,271	2,897

T = 1700 K

0,1	0,13	1,0000	5752,6	10,725	2,253	2,715
1,0	1,27	1,0002	5751,4	9,662	2,254	2,717
5,0	6,37	1,0011	5746,1	8,916	2,257	2,727
10,0	12,72	1,0024	5739,6	8,591	2,260	2,740
20,0	25,36	1,0051	5726,7	8,263	2,268	2,765
30,0	37,93	1,0080	5714,2	8,067	2,275	2,789
40,0	50,41	1,0113	5702,1	7,926	2,282	2,813
50,0	62,79	1,0149	5690,4	7,815	2,289	2,837
60,0	75,06	1,0188	5679,1	7,723	2,296	2,861
70,0	87,22	1,0230	5668,2	7,644	2,302	2,884
80,0	99,24	1,0275	5657,7	7,574	2,309	2,906
90,0	111,13	1,0322	5647,6	7,512	2,315	2,928

T = 1800 K

10,0	12,00	1,0032	6015,6	8,751	2,305	2,782
20,0	23,92	1,0067	6005,1	8,424	2,311	2,803
30,0	35,74	1,0104	5994,9	8,230	2,317	2,824
40,0	47,47	1,0144	5985,0	8,090	2,323	2,844
50,0	59,09	1,0186	5975,5	7,980	2,329	2,864
60,0	70,60	1,0231	5966,3	7,889	2,335	2,884
70,0	81,99	1,0278	5957,5	7,811	2,341	2,903
80,0	93,25	1,0327	5949,1	7,743	2,346	2,922
90,0	104,39	1,0379	5941,0	7,682	2,352	2,940
100,0	115,39	1,0433	5933,3	7,627	2,357	2,958

T = 1900 K

30,0	33,80	1,0121	6278,9	8,385	2,357	2,857
40,0	44,87	1,0166	6270,9	8,246	2,362	2,874
50,0	55,83	1,0213	6263,2	8,137	2,367	2,891
60,0	66,68	1,0261	6255,9	8,047	2,372	2,908
70,0	77,41	1,0312	6248,8	7,970	2,377	2,924
80,0	88,02	1,0365	6242,1	7,903	2,382	2,940
90,0	98,51	1,0419	6235,7	7,843	2,387	2,956
100,0	108,87	1,0475	6229,7	7,789	2,391	2,971

T = 2000 K

50,0	52,94	1,0232	6553,7	8,288	2,403	2,918
60,0	63,21	1,0283	6547,9	8,198	2,408	2,933
70,0	73,37	1,0337	6542,4	8,122	2,412	2,947
80,0	83,41	1,0391	6537,2	8,056	2,416	2,960
90,0	93,33	1,0447	6532,2	7,997	2,420	2,974
100,0	103,13	1,0505	6527,5	7,943	2,424	2,987
120,0	122,36	1,0625	6519,0	7,850	2,432	3,012

Таблица 4.3. Водяной пар

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=800\text{ K}$						
0,1	685,6	1,27	1,003	297,8	69,5	0,921
1,0	683,5	1,27	1,027	298,0	69,8	0,930
2,0	681,2	1,27	1,055	298,2	70,2	0,940
3,0	678,8	1,27	1,083	298,5	70,6	0,950
4,0	676,5	1,27	1,113	298,7	71,0	0,961
5,0	674,1	1,27	1,144	299,0	71,3	0,972
6,0	671,8	1,27	1,177	299,3	71,7	0,984
8,0	667,0	1,28	1,246	300,0	72,6	1,009
10,0	662,1	1,28	1,320	300,7	73,4	1,036
12,0	657,2	1,28	1,402	301,5	74,3	1,065
16,0	647,3	1,28	1,590	303,4	76,3	1,131
$T=900\text{ K}$						
0,1	724,1	1,26	1,002	340,4	83,4	0,905
1,0	722,9	1,26	1,017	340,9	83,7	0,911
2,0	721,5	1,26	1,035	341,4	84,0	0,917
3,0	720,1	1,26	1,053	342,0	84,4	0,924
4,0	718,8	1,27	1,072	342,5	84,7	0,930
5,0	717,4	1,27	1,091	343,1	85,1	0,937
6,0	716,1	1,27	1,110	343,7	85,4	0,944
8,0	713,4	1,27	1,150	345,0	86,1	0,958
10,0	710,8	1,27	1,192	346,3	86,9	0,973
12,0	708,2	1,27	1,236	347,6	87,6	0,988
16,0	703,1	1,28	1,329	350,5	89,2	1,021
20,0	698,2	1,28	1,431	353,7	90,9	1,057
25,0	692,4	1,29	1,571	358,1	93,2	1,106
$T=1000\text{ K}$						
0,1	760,3	1,25	1,001	379,8	97,6	0,891
1,0	759,5	1,25	1,012	380,4	97,8	0,895
5,0	756,5	1,26	1,062	382,9	99,0	0,912
10,0	752,9	1,26	1,127	386,2	100,5	0,935
20,0	746,8	1,28	1,268	393,8	103,9	0,985
30,0	742,2	1,29	1,424	402,6	107,6	1,041
$T=1100\text{ K}$						
0,1	794,4	1,24	1,001	416,5	111,9	0,878
1,0	794,1	1,24	1,009	417,0	112,1	0,881
5,0	792,6	1,25	1,044	419,4	113,1	0,893
10,0	791,0	1,25	1,088	422,6	114,4	0,909
20,0	788,8	1,27	1,181	429,6	117,3	0,942
30,0	787,9	1,28	1,278	437,3	120,3	0,977
40,0	788,5	1,30	1,376	446,0	123,7	1,014
$T=1200\text{ K}$						
0,1	826,9	1,23	1,001	450,8	126,4	0,866
1,0	826,8	1,24	1,006	451,3	126,6	0,868
4,0	826,6	1,24	1,025	453,0	127,2	0,875
5,0	826,5	1,24	1,032	453,5	127,4	0,877
10,0	826,3	1,25	1,064	456,4	128,6	0,888
20,0	826,6	1,26	1,129	462,6	131,0	0,911
30,0	828,1	1,27	1,194	469,4	133,6	0,935

Водяной пар

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
40,0	830,7	1,29	1,258	476,9	136,4	0,960
50,0	834,6	1,31	1,320	484,9	139,4	0,985
<i>T=1300 K</i>						
0,1	858,1	1,23	1,000	483,3	140,9	0,855
1,0	858,2	1,23	1,005	483,7	141,1	0,857
5,0	858,6	1,23	1,024	485,7	141,8	0,863
10,0	859,4	1,24	1,048	488,3	142,8	0,872
20,0	861,5	1,25	1,095	493,8	145,0	0,889
30,0	864,6	1,26	1,140	499,8	147,2	0,906
40,0	868,6	1,28	1,185	506,2	149,7	0,923
50,0	873,5	1,30	1,227	513,1	152,2	0,941
60,0	879,4	1,32	1,267	520,4	154,9	0,958
<i>T=1400 K</i>						
0,1	888,1	1,22	1,000	514,1	155,4	0,845
1,0	888,3	1,22	1,004	514,5	155,5	0,846
5,0	889,3	1,23	1,018	516,3	156,2	0,851
10,0	890,8	1,23	1,036	518,6	157,1	0,858
20,0	894,3	1,24	1,071	523,5	159,0	0,871
30,0	898,5	1,26	1,105	528,8	161,0	0,884
40,0	903,4	1,27	1,137	534,4	163,2	0,897
50,0	909,1	1,29	1,167	540,4	165,4	0,909
60,0	915,5	1,31	1,195	546,7	167,8	0,922
70,0	922,7	1,33	1,220	553,4	170,3	0,934
<i>T=1500 K</i>						
0,1	917,0	1,21	1,000	543,6	169,8	0,836
1,0	917,4	1,22	1,003	543,9	169,9	0,837
5,0	918,8	1,22	1,014	545,5	170,5	0,841
10,0	920,8	1,23	1,028	547,6	171,3	0,846
20,0	925,3	1,24	1,054	552,0	173,1	0,856
30,0	930,3	1,25	1,079	556,7	174,9	0,866
40,0	935,9	1,26	1,103	561,7	176,8	0,876
50,0	942,2	1,28	1,125	566,9	178,8	0,886
60,0	949,0	1,29	1,145	572,5	180,9	0,895
70,0	956,4	1,31	1,164	578,3	183,1	0,905
<i>T=1600 K</i>						
0,1	945,1	1,21	1,000	571,7	183,9	0,828
1,0	945,5	1,21	1,002	572,1	184,1	0,829
5,0	947,3	1,21	1,011	573,5	184,6	0,832
10,0	949,7	1,22	1,021	575,4	185,4	0,836
20,0	954,8	1,23	1,042	579,4	187,0	0,844
30,0	960,5	1,24	1,061	583,6	188,6	0,852
40,0	966,7	1,26	1,078	588,0	190,4	0,860
50,0	973,3	1,27	1,095	592,7	192,2	0,868
60,0	980,4	1,29	1,110	597,6	194,1	0,875
70,0	988,0	1,30	1,123	602,7	196,1	0,882
80,0	996,0	1,32	1,135	608,1	198,1	0,889
<i>T=1700 K</i>						
0,1	972,3	1,20	1,000	598,8	197,9	0,822
1,0	972,8	1,21	1,002	599,1	198,0	0,822

Водяной пар

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
5,0	974,8	1,21	1,008	600,4	198,5	0,825
10,0	977,5	1,22	1,017	602,2	199,2	0,828
20,0	983,3	1,23	1,032	605,7	200,7	0,834
30,0	989,4	1,24	1,047	609,5	202,2	0,841
40,0	995,9	1,25	1,060	613,5	203,8	0,847
50,0	1002,8	1,26	1,072	617,7	205,5	0,853
60,0	1010,2	1,28	1,083	622,1	207,2	0,859
70,0	1017,9	1,29	1,093	626,7	209,0	0,865
80,0	1025,9	1,31	1,102	631,5	210,9	0,870
90,0	1034,3	1,32	1,110	636,4	212,8	0,876

$T=1800 \text{ K}$

10,0	1004,5	1,21	1,013	627,9	212,8	0,821
20,0	1010,6	1,22	1,025	631,2	214,2	0,826
30,0	1017,1	1,23	1,036	634,6	215,6	0,831
40,0	1023,9	1,24	1,046	638,3	217,1	0,836
50,0	1031,1	1,26	1,055	642,1	218,6	0,841
60,0	1038,6	1,27	1,063	646,0	220,2	0,846
70,0	1046,3	1,28	1,071	650,2	221,9	0,851
80,0	1054,4	1,30	1,077	654,4	223,6	0,855
90,0	1062,8	1,31	1,083	658,9	225,4	0,859
100,0	1071,4	1,32	1,087	663,4	227,2	0,864

$T=1900 \text{ K}$

30,0	1043,9	1,23	1,028	659,0	228,7	0,823
40,0	1050,9	1,24	1,035	662,3	230,1	0,827
50,0	1058,2	1,25	1,042	665,7	231,6	0,831
60,0	1065,8	1,26	1,048	669,3	233,1	0,835
70,0	1073,7	1,27	1,053	673,1	234,6	0,839
80,0	1081,7	1,29	1,058	676,9	236,2	0,843
90,0	1090,1	1,30	1,061	680,9	237,8	0,846
100,0	1098,6	1,31	1,065	685,1	239,5	0,850

$T=2000 \text{ K}$

50,0	1084,4	1,25	1,032	688,7	244,3	0,823
60,0	1092,1	1,26	1,036	692,0	245,7	0,826
70,0	1099,9	1,27	1,039	695,4	247,2	0,829
80,0	1108,0	1,28	1,043	699,0	248,7	0,832
90,0	1116,3	1,29	1,045	702,6	250,2	0,835
100,0	1124,7	1,30	1,047	706,4	251,8	0,838
120,0	1142,2	1,33	1,049	714,2	255,0	0,843

4.3. Кривая инверсии водяного пара

Положение кривой инверсии определяется, как известно, формулой

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = 0 \quad (4.11)$$

и может быть рассчитано с помощью термического уравнения состояния.

Левая ветвь кривой инверсии находится в области, где имеются опытные данные по термическим и калорическим свойствам для воды и водяного пара, и

построение достаточно точной линии кривой инверсии в этой области не представляет принципиальных затруднений.

Правая ветвь кривой инверсии располагается в области высоких температур, где нет экспериментальных данных, и построение ее может быть осуществлено только по уравнениям состояния, которые экстраполируются в эту область.

При температуре выше 1473,15—1773,15 К (в зависимости от давления) водяной пар разлагается на химически реагирующую смесь молекул водяного пара и ионы. Кривая инверсии водяного пара, которая рассчитана в настоящей работе, относится к водяному пару без разложения; исследование такого состояния при высоких температурах целесообразно, так как водяной пар в этом состоянии является одним из компонентов смеси.

Приведенное в § 4.1 теоретически обоснованное уравнение состояния водяного пара использовано для расчета кривой инверсии.

Предварительно с помощью полученных констант потенциала рассчитаны значения вириальных коэффициентов $B = B^*h_0$, $C = C^*h_0^2$, $D = D^*h_0^3$ и $E = E^*h_0^4$ в интервале температур 873,15—3673,15 К. Эти значения аппроксимированы полиномами:

$$B = \sum_{i=0}^6 a_i \tau^i; \quad C = \sum_{i=0}^6 c_i \tau^i; \quad D = \sum_{i=0}^6 d_i \tau^i; \quad E = \sum_{i=0}^6 e_i \tau^i,$$

где $\tau = 1000/T$. Константы аппроксимации имеют следующие значения:

$a_0 = 2,03076 \cdot 10^1$	$c_0 = 1,92058 \cdot 10^2$
$a_1 = -9,49435 \cdot 10^0$	$c_1 = 7,69015 \cdot 10^2$
$a_2 = -2,91676 \cdot 10^1$	$c_2 = -2,08153 \cdot 10^3$
$a_3 = -1,58094 \cdot 10^1$	$c_3 = 3,69612 \cdot 10^3$
$a_4 = 2,65239 \cdot 10^1$	$c_4 = -3,98758 \cdot 10^3$
$a_5 = -1,85177 \cdot 10^1$	$c_5 = 2,78443 \cdot 10^3$
$a_6 = 3,89398 \cdot 10^0$	$c_6 = -8,08672 \cdot 10^2$
$d_0 = -1,55968 \cdot 10^3$	$e_0 = 1,23631 \cdot 10^6$
$d_1 = 4,51035 \cdot 10^4$	$e_1 = -1,37836 \cdot 10^7$
$d_2 = -1,48688 \cdot 10^5$	$e_2 = 6,14707 \cdot 10^7$
$d_3 = 2,84874 \cdot 10^5$	$e_3 = -1,35775 \cdot 10^8$
$d_4 = -3,40526 \cdot 10^5$	$e_4 = 1,59209 \cdot 10^8$
$d_5 = 2,17869 \cdot 10^5$	$e_5 = -9,53061 \cdot 10^7$
$d_6 = -5,36721 \cdot 10^4$	$e_6 = 2,29281 \cdot 10^7$

Таким образом, теоретически обоснованное уравнение состояния приведено к более простому виду, т. е.

$$z = pv/(RT) = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + E\rho^4. \quad (4.12)$$

В табл. 4.2 приводятся значения вириальных коэффициентов по уравнению (4.12).

Для сравнения кривая инверсии рассчитана с помощью еще двух уравнений. Одно из них — уравнение состояния Хаара, Галлахера и Келла [150]. Уравнение описывает свойства воды, перегретого пара и надкритической области, т. е. является единым уравнением состояния. Область его действия рекомендована до 1073,15 К при давлении до 4000 МПа. При его составлении авторы использовали некоторые теоретические положения; однако уравнение дополнено эмпирическими функциями для точной аппроксимации свойств воды и водяного пара. Таким образом, уравнение является полумпирическим.

Параметры кривой инверсии водяного пара определены также по уравнению МЭИ [151], которое является чисто эмпирическим и имеет вид

Таблица 4.4. Вириальные коэффициенты водяного пара

T, K	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$C, \text{см}^6/\text{моль}^2$	$D \cdot 10^{-2}, \text{см}^9/\text{моль}^3$	$E \cdot 10^{-3}, \text{см}^{12}/\text{моль}^4$
873,15	-34,64	696	53,2	-22,4
973,15	-24,46	587	36,4	-28,1
1073,15	-17,12	512	30,4	-0,8
1173,15	-11,61	462	29,7	17,2
1273,15	-7,33	428	31,0	28,9
1373,15	-3,93	404	33,0	38,3
1473,15	-1,18	386	35,0	46,8
1573,15	1,09	374	36,7	54,4
1673,15	2,99	364	38,2	60,8
1773,15	4,59	356	39,4	65,7
1873,15	5,96	350	40,3	68,9
2073,15	8,17	340	41,5	70,9
2273,15	9,76	333	42,1	68,3
2473,15	11,18	327	42,2	63,1
2673,15	12,24	322	42,0	56,9
2873,15	13,10	317	41,6	51,1
3073,15	13,81	313	41,0	46,3
3273,15	14,41	310	40,3	43,0
3473,15	14,93	306	39,6	41,4
3673,15	15,36	303	38,8	41,5

$$P = B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + E\rho^4 + F\rho^5 + Q\rho^6, \quad (4.13)$$

где B, C, D, E, F, Q — температурные функции в виде полиномов. Уравнение составлено с помощью аппроксимации табличных и экспериментальных данных об удельных объемах в области от 90 до 200 МПа и от 273,15 до 1123,15 К.

Все три уравнения состояния хорошо описывают те экспериментальные данные по плотности, которые были использованы при их составлении. Погрешность описания составляет сотые доли процента.

Результаты расчета кривой инверсии, которая получена из уравнения (4.11), приведены на рис. 4.4. На этом рисунке заштрихована та область, где имеются экспериментальные данные о плотности.

Левая ветвь кривой инверсии рассчитана по уравнениям из работ [150 и 151]. Наблюдается очень хорошее совпадение расчетных результатов, так как эта часть кривой инверсии почти целиком расположена в области, где имеются экспериментальные данные.

Правая ветвь кривой инверсии рассчитана по уравнению (4.8), а также по уравнениям из [150 и 151]. Полученные результаты, представленные на рис. 4.4, весьма показательны.

Уравнение (4.12), имеющее достаточно строгие теоретические обоснования, и уравнение Хаара, Галлахера и Келла [150], которое, хотя и содержит в себе эмпирические функции, но все же некоторые теоретические обоснования имеет, при расчете кривой инверсии привели к близким результатам, что хорошо видно из рисунка. По уравнению (4.12) расчет кривой инверсии произведен лишь до критической плотности, так как вряд ли можно ожидать, что вириальное уравнение состояния будет хорошо описывать свойства вещества при $\rho > \rho_{кр}$.

Уравнение из [151], которое не имеет теоретических обоснований, тоже как бы содержит в себе кривую инверсии водяного пара, но, однако, она проходит далеко от кривой инверсии, рассчитанной по уравнениям, имеющим теоретические обоснования.

Значительное отличие наблюдается в положении кривой инверсии, рассчитанной по приведенным выше уравнениям и по уравнению Ван-дер-Вааль-

Рис. 4.4. Кривая инверсии водяного пара:

1 — [151]; 2 — [150]; 3 — настоящая работа

са. Точка максимального давления на кривой инверсии по уравнению Ван-дер-Ваальса должна иметь параметры: $p = 9p_{кр} \approx 199$ МПа; $T = 3T_{кр} \approx 1942$ К. Эта точка обозначена на рис. 4.4 буквой И.

Однако точка максимального давления на кривой инверсии, полученная с помощью уравнения (4.12), а также уравнения состояния из [150], имеет давление 380–390 МПа (примерно $17p_{кр}$) и температуру 1250–1400 К (примерно $2T_{кр}$), что существенно отличается от расчета по уравнению Ван-дер-Ваальса (см. рис. 4.4). Это отличие намного больше, чем для других, в первую очередь одноатомных газов. Необходимо отметить, что точка максимального давления на кривой инверсии для водяного пара, рассчитанная по теоретически обоснованным уравнениям, лежит вблизи массива экспериментальных данных, т. е. экстраполяция уравнений по температуре не очень велика, и поэтому положение этой точки сомнений не вызывает.

Кривая инверсии при $p \rightarrow 0$ по уравнению Ван-дер-Ваальса, как известно, имеет температуру $6,75T_{кр}$, или 4369 К; однако при расчете ее по уравнениям (4.12) и Хаара она получается приблизительно равной 2700 К, $4,17T_{кр}$.

В целом возникает существенное отличие положения кривой инверсии для водяного пара от ее положения при расчете по уравнению Ван-дер-Ваальса.

Более точное значение температуры инверсии при $p \rightarrow 0$ можно получить прямым вычислением ее из данных о втором вириальном коэффициенте.

Известно, что зависимость энтальпии от давления определяется как

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -RT^2 \left(\frac{dB'}{dT} + \frac{dC'}{dT}p + \frac{dD'}{dT}p^2 + \dots \right), \quad (4.14)$$

где B' , C' , D' — вириальные коэффициенты из уравнения состояния в ряде по давлению.

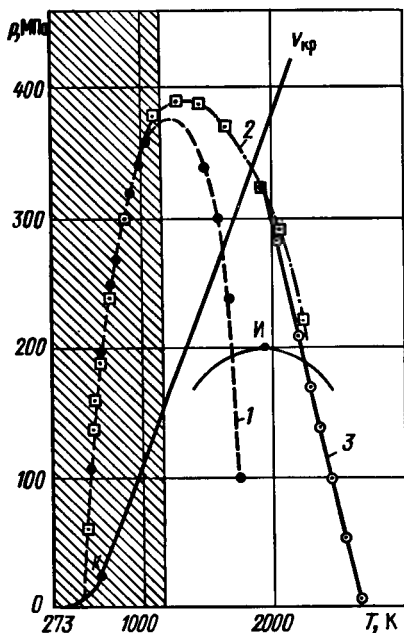
Из формулы (4.10) видно, что при $p \rightarrow 0$ условие для кривой инверсии $(\partial h / \partial p)_T = 0$ превращается в условие $dB'/dT = 0$. Вириальный коэффициент B' определяется как $B' = B/(RT)$, а производная равна:

$$\frac{dB'}{dT} = \frac{1}{RT} \frac{dB}{dT} - \frac{B}{RT^2} = 0,$$

откуда для кривой инверсии при $p \rightarrow 0$ получаем

$$dB/dT = B/T. \quad (4.15)$$

Используя упоминавшееся выше аналитическое выражение для второго вириального коэффициента водяного пара $B = \sum_{i=0}^6 a_i \tau^i$, из уравнения (4.11) с



помощью метода итераций найдена температура инверсии при $p \rightarrow 0$; она равна 2712 К.

Можно считать, что выполненный расчет проясняет положение кривой инверсии водяного пара. Хотя любая экстраполяция в область температур, где отсутствуют экспериментальные данные, содержит в себе некоторую неопределенность, все же примечательно, что два уравнения состояния, имеющие теоретические обоснования (хотя и различной степени строгости), привели при расчете кривой инверсии к совпадающим результатам.

По-видимому, ход правой ветви кривой инверсии водяного пара, рассчитанный по этим двум уравнениям, в настоящее время следует считать наиболее достоверным.

Раздел пятый

Многоатомные газы

5.1. Диоксид углерода

Исследованию термических свойств диоксида углерода посвящено большое количество работ. Анализ этих работ показывает, что наиболее достоверными и охватывающими широкую область параметров состояния, являются данные экспериментальных работ, приведенные в [152].

При получении уравнения состояния диоксида углерода обработано 166 опытных точек из указанных работ в интервале температур 573—1073 К и плотностей 0—300 кг/м³. На рис. 5.1 эта область показана в виде заштрихованной площади. Уравнение состояния диоксида углерода получено двумя путями: с помощью потенциала Леннарда-Джонса (12-6) и потенциала сферической оболочки.

Молекула диоксида углерода несколько асимметрична и обладает заметным электрическим квадрупольным моментом, поэтому естественно ожидать, что параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6) зависят от температуры, а сам потенциал малопригоден для далекой экстраполяции. Подробное исследование по изотермам показало, что такая зависимость для молекул диоксида углерода наблюдается, но с ростом температуры уменьшается. В области параметров состояния, принятой для обработки, эта зависимость незначительна.

Полученные константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) имеют следующие значения: $\epsilon/k = 213,382790$ К и $b_0 = 1,60615673$ м³/кг. Средняя квадратическая погрешность описания уравнением состояния экспериментальных данных составляет 0,12%.

В процессе получения уравнения состояния приведенные вириальные

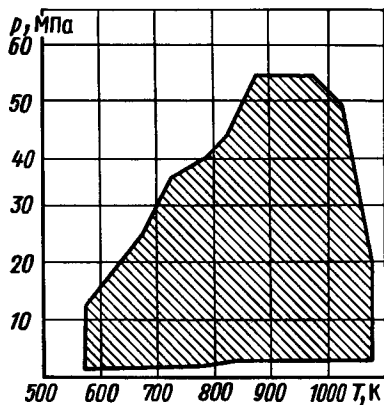


Рис. 5.1. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости диоксида углерода в газообразном состоянии

коэффициенты по данным [1 и 5] аппроксимированы полиномами по обратным степеням приведенных температур в интервале $T^* = 2 \div 20$ со следующими коэффициентами:

$$\begin{array}{ll} a_0 = 5,05025173 \cdot 10^{-1} & c_0 = 1,42487354 \cdot 10^{-1} \\ a_1 = 1,84660631 \cdot 10^0 & c_1 = 3,21042713 \cdot 10^0 \\ a_2 = -3,70191967 \cdot 10^1 & c_2 = -2,95153573 \cdot 10^1 \\ a_3 = 1,97038118 \cdot 10^2 & c_3 = 1,62847488 \cdot 10^2 \\ a_4 = -6,87391863 \cdot 10^2 & c_4 = -5,55654840 \cdot 10^2 \\ a_5 = 1,51782213 \cdot 10^3 & c_5 = 1,20306696 \cdot 10^3 \\ a_6 = -2,04596419 \cdot 10^3 & c_6 = -1,58908640 \cdot 10^3 \\ a_7 = 1,53284141 \cdot 10^3 & c_7 = 1,16303559 \cdot 10^3 \\ a_8 = -4,88431431 \cdot 10^2 & c_8 = -3,61460796 \cdot 10^2 \\ \\ d_0 = 1,61089003 \cdot 10^{-2} & e_0 = -1,24767139 \cdot 10^{-3} \\ d_1 = 1,88304238 \cdot 10^0 & e_1 = 4,91867600 \cdot 10^0 \\ d_2 = -1,35700501 \cdot 10^1 & e_2 = 1,12499498 \cdot 10^0 \\ d_3 = 6,55117962 \cdot 10^1 & e_3 = -4,17500265 \cdot 10^1 \\ d_4 = -2,32194509 \cdot 10^2 & e_4 = -2,27817039 \cdot 10^1 \\ d_5 = 5,40619935 \cdot 10^2 & e_5 = 6,07403319 \cdot 10^1 \\ d_6 = -7,57899628 \cdot 10^2 & e_6 = -1,12130864 \cdot 10^2 \\ d_7 = 5,87436054 \cdot 10^2 & e_7 = 1,31459295 \cdot 10^2 \\ d_8 = -1,94709036 \cdot 10^2 & e_8 = -6,25987226 \cdot 10^1 \end{array}$$

Получены также единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6) для уравнения состояния и уравнений, описывающих неравновесные свойства. В обработку включены приведенные выше уравнение состояния и данные о вязкости и теплопроводности диоксида углерода из [153]. С помощью метода переаппроксимации, изложенного в § 1.7, получены единые константы потенциала.

При этом средние квадратические погрешности описания данных составили, %: $\delta z = 0,18$; $\delta \eta = 1,65$; $\delta \lambda = 1,85$.

Уравнение состояния получено также с помощью трехпараметрического потенциала сферической оболочки, который должен лучше отражать характер взаимодействия молекул диоксида углерода. Как известно, потенциал сферической оболочки имеет три параметра: ϵ/k , r_0^* и d (см. § 1.2). При $r_0^* = 2,5$ в уравнение состояния включены те же полиномы, аппроксимирующие второй, третий и четвертый приведенные вириальные коэффициенты, что и для ксенона (§ 2.3).

В результате минимизации функционала (1.4) получены константы потенциала ss ; при этом средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных уравнением состояния $\delta z = 0,1\%$.

По уравнениям состояния диоксида углерода, составленным на базе потенциалов Леннарда-Джонса (12-6) и сферической оболочки, рассчитаны термодинамические свойства. Для сравнения в табл. 5.1 приведены значения удельной плотности, энтальпии и энтропии, полученные по этим уравнениям в области экстраполяции.

Из таблицы видно, что результаты экстраполяции уравнений состояния, основанных на потенциалах Леннарда-Джонса (12-6) и сферической оболочки, довольно близки. Например, максимальное отклонение значений плотности, рассчитанные по этим уравнениям, составляет около 1% при температуре 2000 К и давлении 100 МПа, т. е. далеко за пределами области эксперимента, что подтверждает надежность экстраполяции теоретически обоснованного уравнения состояния.

Так как потенциал сферической оболочки является более подходящим для описания взаимодействия молекул диоксида углерода, таблицы термодинамических функций рассчитаны по уравнению состояния, основанному на этом потенциале.

Таблица 5.1. Термодинамические функции диоксида углерода, рассчитанные по различным потенциалам взаимодействия

p , МПа	Функции	Температура T , К		
		1000	1500	2000
5	ρ	26,23/26,20	17,46/17,44	13,11/13,10
	h	1565,7/1565,5	2211,9/2212,0	2889,0/2889,1
	s	5,376/5,375	5,899/5,898	6,288/6,287
50	ρ	233,8/233,4	157,9/156,8	120,5/119,6
	h	1555,7/1552,4	2222,4/2222,5	2910,3/2910,9
	s	4,911/4,907	5,451/5,450	5,847/5,845
100	ρ	—	282,8/280,4	220,4/217,9
	h	—	2242,5/2241,1	2937,6/2938,4
	s	—	5,311/5,307	5,711/5,708

Примечание. В числителе — значения по Леннард-Джонсу, в знаменателе по ss .

Для расчета калорических функций значения теплоемкости, энтальпии и энтропии диоксида углерода в идеальном-газовом состоянии, приведенные в [36], аппроксимированы с высокой точностью в интервале от 500 до 3000 К полиномами вида (3.2).

За начало отсчета энтальпии принято состояние кристалла при 0 К. Теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 596,5$ кДж/кг [37].

Приводим значения констант аппроксимирующих полиномов для расчета идеальном-газовых функций диоксида углерода:

$$\begin{array}{lll}
 \alpha_0 = 7,70968987 \cdot 10^0 & \beta_0 = 7,85253012 \cdot 10^0 & \gamma_0 = 5,30961715 \cdot 10^1 \\
 \alpha_1 = -1,29860371 \cdot 10^0 & \beta_1 = -6,90349513 \cdot 10^{-1} & \gamma_1 = -6,38550008 \cdot 10^1 \\
 \alpha_2 = 2,96425621 \cdot 10^0 & \beta_2 = -2,26831022 \cdot 10^0 & \gamma_2 = 1,08306548 \cdot 10^2 \\
 \alpha_3 = -1,56491592 \cdot 10^0 & \beta_3 = 4,54250883 \cdot 10^0 & \gamma_3 = -1,26228868 \cdot 10^2 \\
 \alpha_4 = 6,39723909 \cdot 10^{-1} & \beta_4 = -5,67835939 \cdot 10^0 & \gamma_4 = 9,45257903 \cdot 10^1 \\
 \alpha_5 = -1,69570764 \cdot 10^{-1} & \beta_5 = 3,98377360 \cdot 10^0 & \gamma_5 = -4,327694482 \cdot 10^1 \\
 \alpha_6 = 2,04136631 \cdot 10^{-2} & \beta_6 = -1,40410065 \cdot 10^0 & \gamma_6 = 1,09926289 \cdot 10^1 \\
 & \beta_7 = 1,94254415 \cdot 10^{-1} & \gamma_7 = -1,18454992 \cdot 10^0
 \end{array}$$

Таблицы неравновесных свойств диоксида углерода рассчитаны с помощью параметров потенциала Леннарда-Джонса (12-6), полученных методом переаппроксимации.

Коэффициент динамической вязкости при атмосферном давлении рассчитан по уравнению Чепмена — Энскога (1.24). Аппроксимация интегралов столкновения приведена в § 2.1.

Вязкость при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению с тремя членами ряда (1.25). Константы аппроксимации B'_η и C'_η использованы те же, что и в § 2.1.

Теплопроводность при атмосферном давлении рассчитана по уравнению (1.27). Функция $\beta_0(T^*)$ для диоксида углерода рассчитана и аппроксимирована полиномом $\beta_0(T^*) = \sum_{i=1}^5 m_i (\epsilon_i / (kT))^i$.

Теплопроводность диоксида углерода при повышенном давлении рассчитана по вириальному уравнению вида (1.25). Для комплекса C'_η использованы те же значения констант аппроксимации и соответствующих им степеней аргументов, что и в § 2.1.

Значения B_{λ}^* для диоксида углерода рассчитаны по методике [22], и комплекс B_{λ}^* аппроксимирован полиномом по обратным степеням приведенной температуры.

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов и степени аргументов в них для $\beta_0(T^*)$ и B_{λ}^* имеют следующие значения:

$$\begin{array}{llll} m_1 = -1,14863 \cdot 10^1 & s_1 = 4 & p_1 = -5,28260 \cdot 10^0 & s_1 = 2,0 \\ m_2 = 1,58518 \cdot 10^1 & s_2 = 3 & p_2 = 1,26120 \cdot 10^1 & s_2 = 1,5 \\ m_3 = -5,25704 \cdot 10^0 & s_3 = 2 & p_3 = -1,11070 \cdot 10^1 & s_3 = 1,0 \\ m_4 = -1,96247 \cdot 10^0 & s_4 = 1 & p_4 = 4,67890 \cdot 10^0 & s_4 = 0,5 \\ m_5 = 2,96207 \cdot 10^0 & s_5 = 0 & p_5 = -3,08970 \cdot 10^{-1} & s_5 = 0 \end{array}$$

При расчете таблиц теплофизических свойств использовались следующие значения физических констант диоксида углерода:

масса моля $\mu = 44,011$ г/моль;

газовая постоянная $R = 0,188915$ кДж/(кг · К);

теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 596,5$ кДж/кг;

единые константы потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\epsilon/k = 217,26$ К;
 $b_0 = 1,5978 \cdot 10^{-3}$ м³/кг;

константы потенциала ss: $r_0^* = 2,5$; $b_0 = 1,95103 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\epsilon/k = 308,058293$ К.

Таблицы рассчитаны в интервале 600—2500 К. Максимальное давление на изотермах определяется плотностью $\rho = 300$ кг/м³. Результаты расчета теплофизических свойств диоксида углерода представлены в табл. 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2. Диоксид углерода

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T = 600$ К						
0,1	0,88	0,9997	1102,4	5,527	0,887	1,076
1,0	8,85	0,9974	1100,5	5,089	0,888	1,083
2,0	17,73	0,9949	1098,4	4,955	0,889	1,090
3,0	26,67	0,9926	1096,3	4,876	0,890	1,097
4,0	35,63	0,9903	1094,2	4,818	0,891	1,105
5,0	44,64	0,9882	1092,1	4,773	0,892	1,112
6,0	53,67	0,9862	1090,1	4,736	0,893	1,120
8,0	71,82	0,9827	1086,0	4,676	0,895	1,135
10,0	90,05	0,9797	1082,0	4,627	0,897	1,151
12,0	108,32	0,9774	1078,0	4,587	0,898	1,166
16,0	144,85	0,9745	1070,3	4,521	0,902	1,197
20,0	181,12	0,9742	1063,0	4,468	0,905	1,228
25,0	225,66	0,9774	1054,5	4,413	0,908	1,263
30,0	268,85	0,9845	1046,7	4,366	0,911	1,296
$T = 700$ К						
0,1	0,76	1,0000	1212,6	5,697	0,937	1,126
1,0	7,56	0,9997	1211,2	5,260	0,937	1,130
2,0	15,13	0,9994	1209,7	5,127	0,938	1,135
3,0	22,70	0,9993	1208,2	5,049	0,939	1,140
4,0	30,27	0,9992	1206,7	4,992	0,939	1,145
5,0	37,84	0,9993	1205,3	4,948	0,940	1,150
6,0	45,40	0,9994	1203,8	4,912	0,940	1,155
8,0	60,50	1,0000	1201,0	4,853	0,942	1,165
10,0	75,55	1,0009	1198,2	4,807	0,943	1,175
12,0	90,54	1,0022	1195,4	4,769	0,944	1,184
16,0	120,27	1,0060	1190,2	4,707	0,946	1,204
20,0	149,54	1,0114	1185,3	4,657	0,948	1,222

Диоксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
25,0	185,32	1,0201	1179,5	4,606	0,951	1,244
30,0	220,02	1,0311	1174,3	4,563	0,953	1,264
35,0	253,51	1,0440	1169,6	4,526	0,955	1,283
40,0	285,69	1,0588	1165,3	4,494	0,957	1,299

T = 800 K

0,1	0,66	1,0001	1327,4	5,850	0,979	1,168
1,0	6,61	1,0009	1326,4	5,414	0,979	1,171
2,0	13,21	1,0019	1325,3	5,282	0,980	1,175
3,0	19,79	1,0029	1324,3	5,203	0,980	1,178
4,0	26,36	1,0040	1323,2	5,148	0,981	1,182
5,0	32,91	1,0052	1322,1	5,104	0,981	1,186
6,0	39,45	1,0064	1321,1	5,068	0,982	1,189
8,0	52,46	1,0091	1319,1	5,011	0,982	1,196
10,0	65,38	1,0120	1317,1	4,966	0,983	1,203
12,0	78,22	1,0152	1315,2	4,928	0,984	1,210
16,0	103,56	1,0223	1311,5	4,868	0,986	1,223
20,0	128,43	1,0304	1308,1	4,821	0,987	1,235
25,0	158,77	1,0418	1304,2	4,772	0,989	1,250
30,0	188,21	1,0547	1300,7	4,732	0,991	1,265
35,0	216,68	1,0688	1297,5	4,697	0,992	1,278
40,0	244,16	1,0840	1294,6	4,666	0,993	1,290
45,0	270,63	1,1002	1292,1	4,639	0,995	1,301
50,0	296,09	1,1173	1289,9	4,614	0,996	1,311

T = 900 K

0,1	0,59	1,0002	1446,1	5,990	1,015	1,204
1,0	5,87	1,0016	1445,4	5,554	1,015	1,206
2,0	11,73	1,0032	1444,7	5,422	1,016	1,209
3,0	17,56	1,0049	1443,9	5,344	1,016	1,212
4,0	23,37	1,0067	1443,1	5,289	1,016	1,215
5,0	29,16	1,0084	1442,4	5,245	1,017	1,217
6,0	34,93	1,0103	1441,7	5,210	1,017	1,220
8,0	46,40	1,0141	1440,2	5,153	1,018	1,225
10,0	57,77	1,0180	1438,8	5,109	1,018	1,230
12,0	69,05	1,0222	1437,5	5,072	1,019	1,235
16,0	91,27	1,0310	1435,0	5,014	1,020	1,245
20,0	113,05	1,0405	1432,7	4,967	1,021	1,254
25,0	139,60	1,0533	1430,0	4,920	1,023	1,265
30,0	165,38	1,0669	1427,7	4,881	1,024	1,276
35,0	190,35	1,0815	1425,6	4,848	1,025	1,286
40,0	214,51	1,0967	1423,8	4,818	1,026	1,295
45,0	237,87	1,1127	1422,3	4,792	1,027	1,303
50,0	260,42	1,1292	1421,0	4,768	1,028	1,311

T = 1000 K

0,1	0,53	1,0002	1568,1	6,119	1,045	1,234
1,0	5,28	1,0020	1567,6	5,683	1,045	1,236
5,0	26,20	1,0103	1565,5	5,375	1,046	1,244
10,0	51,83	1,0213	1563,1	5,240	1,048	1,255
20,0	101,23	1,0459	1559,1	5,101	1,050	1,273
30,0	147,98	1,0731	1556,0	5,017	1,052	1,290
40,0	192,01	1,1027	1553,8	4,955	1,054	1,305

Диоксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
50,0	233,35	1,1342	1552,4	4,907	1,056	1,318
60,0	272,11	1,1672	1551,8	4,866	1,058	1,330
<i>T=1100 K</i>						
0,1	0,48	1,0002	1692,8	6,238	1,070	1,259
1,0	4,80	1,0022	1692,5	5,802	1,071	1,261
5,0	23,79	1,0113	1691,2	5,495	1,071	1,268
10,0	47,03	1,0231	1689,7	5,361	1,073	1,276
20,0	91,79	1,0485	1687,3	5,223	1,075	1,291
30,0	134,18	1,0759	1685,7	5,140	1,076	1,304
40,0	174,21	1,1049	1684,9	5,080	1,078	1,316
50,0	211,93	1,1353	1684,7	5,033	1,080	1,327
60,0	247,47	1,1668	1685,1	4,994	1,081	1,337
70,0	280,94	1,1990	1686,0	4,960	1,083	1,345
<i>T=1200 K</i>						
0,1	0,44	1,0002	1819,8	6,348	1,091	1,280
1,0	4,40	1,0023	1819,6	5,913	1,092	1,282
4,0	17,48	1,0094	1819,1	5,649	1,092	1,286
5,0	21,80	1,0117	1818,9	5,606	1,092	1,287
10,0	43,08	1,0239	1818,1	5,473	1,093	1,294
20,0	84,06	1,0496	1817,1	5,336	1,095	1,306
30,0	122,92	1,0766	1816,8	5,255	1,097	1,317
40,0	159,70	1,1049	1817,0	5,196	1,098	1,327
50,0	194,47	1,1341	1817,8	5,149	1,100	1,336
60,0	227,34	1,1642	1819,1	5,111	1,101	1,345
70,0	258,43	1,1948	1820,8	5,078	1,103	1,352
80,0	287,86	1,2259	1822,8	5,049	1,104	1,359
<i>T=1300 K</i>						
0,1	0,41	1,0002	1948,7	6,452	1,109	1,298
1,0	4,06	1,0024	1948,7	6,016	1,109	1,299
5,0	20,12	1,0119	1948,4	5,710	1,110	1,304
10,0	39,76	1,0242	1948,3	5,577	1,111	1,309
20,0	77,59	1,0496	1948,4	5,441	1,112	1,320
30,0	113,51	1,0762	1949,1	5,360	1,114	1,329
40,0	147,59	1,1036	1950,3	5,302	1,115	1,338
50,0	179,90	1,1317	1951,9	5,256	1,117	1,345
60,0	210,54	1,1604	1953,9	5,218	1,118	1,352
70,0	239,61	1,1896	1956,3	5,186	1,119	1,359
80,0	267,21	1,2191	1959,0	5,158	1,121	1,365
90,0	293,46	1,2488	1961,9	5,133	1,122	1,370
<i>T=1400 K</i>						
0,1	0,38	1,0002	2079,3	6,548	1,124	1,313
1,0	3,77	1,0024	2079,4	6,113	1,125	1,314
5,0	18,68	1,0119	2079,5	5,807	1,125	1,318
10,0	36,92	1,0241	2079,9	5,674	1,126	1,323
20,0	72,08	1,0491	2081,0	5,539	1,127	1,332
30,0	105,52	1,0750	2082,5	5,459	1,129	1,340
40,0	137,31	1,1015	2084,5	5,401	1,130	1,347
50,0	167,52	1,1285	2086,8	5,356	1,131	1,354
60,0	196,24	1,1560	2089,5	5,319	1,132	1,360
70,0	223,58	1,1838	2092,5	5,287	1,134	1,365

Диоксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
80,0	249,60	1,2118	2095,7	5,259	1,135	1,371
90,0	274,41	1,2401	2099,2	5,234	1,136	1,375
100,0	298,09	1,2684	2102,9	5,212	1,137	1,380
<i>T=1500 K</i>						
0,1	0,35	1,0002	2211,3	6,639	1,137	1,326
1,0	3,52	1,0023	2211,4	6,204	1,138	1,327
5,0	17,44	1,0118	2212,0	5,898	1,138	1,331
10,0	34,47	1,0238	2212,8	5,766	1,139	1,335
20,0	67,33	1,0483	2214,6	5,631	1,140	1,342
30,0	98,63	1,0734	2216,9	5,552	1,141	1,349
40,0	128,44	1,0990	2219,6	5,494	1,142	1,355
50,0	156,84	1,1250	2222,5	5,450	1,144	1,361
60,0	183,91	1,1513	2225,8	5,413	1,145	1,366
70,0	209,73	1,1778	2229,3	5,381	1,146	1,371
80,0	234,37	1,2046	2233,0	5,353	1,147	1,376
90,0	257,91	1,2314	2237,0	5,329	1,148	1,380
100,0	280,44	1,2584	2241,1	5,307	1,149	1,384
<i>T=1750 K</i>						
0,1	0,30	1,0002	2546,4	6,845	1,163	1,352
1,0	3,02	1,0022	2546,6	6,410	1,163	1,353
5,0	14,96	1,0112	2547,9	6,105	1,164	1,355
10,0	29,58	1,0225	2549,5	5,973	1,164	1,358
20,0	57,87	1,0454	2553,0	5,840	1,165	1,363
30,0	84,92	1,0686	2556,7	5,761	1,166	1,368
40,0	110,80	1,0920	2560,7	5,704	1,167	1,373
50,0	135,57	1,1156	2564,9	5,660	1,168	1,377
60,0	159,29	1,1394	2569,3	5,624	1,169	1,381
70,0	182,02	1,1632	2573,9	5,593	1,170	1,385
80,0	203,83	1,1872	2578,6	5,566	1,171	1,388
90,0	224,78	1,2111	2583,5	5,542	1,171	1,391
100,0	244,90	1,2351	2588,5	5,521	1,172	1,395
120,0	282,91	1,2830	2598,8	5,483	1,174	1,400
<i>T=2000 K</i>						
0,1	0,26	1,0002	2887,0	7,027	1,182	1,371
1,0	2,64	1,0021	2887,4	6,592	1,182	1,371
5,0	13,10	1,0105	2889,1	6,287	1,182	1,373
10,0	25,92	1,0210	2891,4	6,155	1,183	1,375
20,0	50,79	1,0423	2896,0	6,023	1,184	1,379
30,0	74,65	1,0636	2900,8	5,945	1,184	1,383
40,0	97,57	1,0851	2905,8	5,889	1,185	1,386
50,0	119,59	1,1066	2910,9	5,845	1,186	1,390
60,0	140,76	1,1282	2916,2	5,809	1,187	1,393
70,0	161,13	1,1498	2921,6	5,779	1,187	1,395
80,0	180,74	1,1715	2927,1	5,752	1,188	1,398
90,0	199,65	1,1931	2932,7	5,729	1,189	1,401
100,0	217,88	1,2147	2938,4	5,708	1,189	1,403
120,0	252,50	1,2578	2949,9	5,671	1,191	1,408
140,0	284,87	1,3007	2961,8	5,640	1,192	1,412
<i>T=2250 K</i>						
0,1	0,24	1,0002	3231,7	7,190	1,197	1,385

Диоксид углерода

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
1,0	2,35	1,0020	3232,2	6,755	1,197	1,386
5,0	11,65	1,0098	3234,3	6,450	1,197	1,387
10,0	28,07	1,0196	3237,0	6,319	1,197	1,389
20,0	45,28	1,0392	3242,5	6,187	1,198	1,392
30,0	66,65	1,0589	3248,1	6,109	1,198	1,395
40,0	87,24	1,0787	3253,8	6,053	1,199	1,397
50,0	107,09	1,0985	3259,7	6,010	1,200	1,400
60,0	126,23	1,1182	3265,6	5,974	1,200	1,402
70,0	144,71	1,1380	3271,7	5,944	1,201	1,404
80,0	162,57	1,1577	3277,8	5,918	1,201	1,406
90,0	179,83	1,1774	3283,9	5,895	1,202	1,409
100,0	196,53	1,1971	3290,2	5,874	1,202	1,410
120,0	228,35	1,2363	3302,8	5,838	1,203	1,414
140,0	258,28	1,2752	3315,6	5,807	1,205	1,418
160,0	286,49	1,3139	3328,4	5,780	1,206	1,421

T = 2500 К

0,1	0,21	1,0002	3579,6	7,337	1,208	1,397
1,0	2,11	1,0018	3580,1	6,902	1,208	1,397
5,0	10,49	1,0091	3582,5	6,597	1,208	1,398
10,0	20,79	1,0182	3585,6	6,466	1,208	1,399
20,0	40,86	1,0365	3591,7	6,334	1,209	1,402
30,0	60,23	1,0547	3598,0	6,257	1,209	1,404
40,0	78,93	1,0730	3604,3	6,201	1,210	1,406
50,0	97,02	1,0912	3610,7	6,158	1,210	1,408
60,0	114,51	1,1094	3617,2	6,123	1,211	1,410
70,0	131,44	1,1276	3623,7	6,093	1,211	1,412
80,0	147,84	1,1457	3630,3	6,067	1,212	1,414
90,0	163,74	1,1638	3636,9	6,044	1,212	1,415
100,0	179,15	1,1819	3643,6	6,023	1,213	1,417
120,0	208,64	1,2178	3657,1	5,987	1,214	1,420
140,0	236,49	1,2535	3670,6	5,957	1,215	1,423
160,0	262,84	1,2889	3684,2	5,930	1,215	1,425
180,0	287,86	1,3240	3697,9	5,907	1,216	1,428

Таблица 5.3. Диоксид углерода

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
<i>T</i> = 600 К						
0,1	370,8	1,21	1,002	280,8	40,1	0,753
1,0	370,9	1,22	1,019	282,2	40,3	0,759
2,0	371,0	1,22	1,037	283,8	40,4	0,765
3,0	371,2	1,22	1,056	285,4	40,6	0,771
4,0	371,5	1,23	1,074	287,2	40,8	0,778
5,0	371,9	1,23	1,092	289,0	41,0	0,784
6,0	372,3	1,24	1,110	290,9	41,2	0,791
8,0	373,5	1,25	1,146	294,9	41,6	0,805
10,0	375,0	1,27	1,180	299,2	42,0	0,819
12,0	376,9	1,28	1,212	303,9	42,5	0,834
16,0	381,7	1,32	1,271	313,9	43,5	0,864

Диоксид углерода

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
20,0	388,0	1,36	1,321	325,0	44,6	0,895
25,0	397,9	1,43	1,368	340,2	46,1	0,933
30,0	409,6	1,50	1,398	356,5	47,6	0,970

T=700 K

0,1	398,7	1,20	1,001	316,0	47,3	0,752
1,0	399,2	1,21	1,011	317,2	47,5	0,756
2,0	399,9	1,21	1,023	318,5	47,6	0,760
3,0	400,6	1,21	1,034	319,8	47,8	0,764
4,0	401,4	1,22	1,045	321,3	47,9	0,768
5,0	402,2	1,22	1,055	322,7	48,1	0,772
6,0	403,1	1,23	1,065	324,2	48,2	0,776
8,0	405,1	1,24	1,085	327,4	48,6	0,785
10,0	407,2	1,25	1,104	330,8	49,0	0,794
12,0	409,6	1,27	1,122	334,3	49,3	0,803
16,0	415,2	1,30	1,153	342,0	50,1	0,821
20,0	421,6	1,33	1,179	350,2	51,0	0,840
25,0	430,7	1,38	1,203	361,3	52,1	0,863
30,0	441,0	1,43	1,219	373,1	53,3	0,885
35,0	452,2	1,48	1,228	385,5	54,5	0,907
40,0	464,2	1,54	1,230	398,3	55,8	0,928

T=800 K

0,1	424,7	1,19	1,001	348,9	54,3	0,751
1,0	425,6	1,20	1,007	349,9	54,4	0,753
2,0	426,5	1,20	1,014	351,0	54,5	0,756
3,0	427,5	1,21	1,021	352,2	54,7	0,759
4,0	428,6	1,21	1,028	353,4	54,8	0,762
5,0	429,7	1,22	1,034	354,6	55,0	0,765
6,0	430,9	1,22	1,041	355,8	55,1	0,768
8,0	433,3	1,23	1,052	358,4	55,4	0,774
10,0	435,8	1,24	1,064	361,2	55,7	0,779
12,0	438,6	1,25	1,074	364,0	56,1	0,786
16,0	444,5	1,28	1,091	370,1	56,7	0,798
20,0	451,0	1,31	1,106	376,7	57,4	0,810
25,0	459,8	1,34	1,119	385,4	58,4	0,826
30,0	469,5	1,38	1,127	394,6	59,3	0,841
35,0	479,7	1,42	1,130	404,3	60,3	0,856
40,0	490,5	1,47	1,130	414,3	61,4	0,870
45,0	501,8	1,51	1,127	424,5	62,4	0,885
50,0	513,3	1,56	1,121	435,0	63,5	0,898

T=900 K

0,1	449,2	1,19	1,000	380,0	61,0	0,750
1,0	450,2	1,19	1,005	380,8	61,1	0,752
2,0	451,4	1,19	1,009	381,8	61,2	0,754
3,0	452,6	1,20	1,013	382,8	61,4	0,756
4,0	453,9	1,20	1,018	383,8	61,5	0,758
5,0	455,1	1,21	1,022	384,8	61,6	0,760
6,0	456,4	1,21	1,025	385,9	61,8	0,762
8,0	459,1	1,22	1,033	388,1	62,0	0,766
10,0	461,9	1,23	1,039	390,4	62,3	0,771
12,0	464,8	1,24	1,045	392,8	62,6	0,775

Диоксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
16,0	471,0	1,27	1,055	397,8	63,2	0,784
20,0	477,6	1,29	1,063	403,2	63,8	0,793
25,0	486,3	1,32	1,069	410,4	64,6	0,804
30,0	495,5	1,35	1,073	417,9	65,4	0,815
35,0	505,2	1,39	1,073	425,8	66,3	0,826
40,0	515,3	1,42	1,071	434,0	67,2	0,836
45,0	525,7	1,46	1,068	442,4	68,1	0,847
50,0	536,3	1,50	1,062	450,9	69,0	0,857

$T=1000\text{ K}$

0,1	472,4	1,18	1,000	409,6	67,4	0,749
1,0	473,6	1,18	1,003	410,3	67,5	0,751
5,0	479,0	1,20	1,013	413,7	68,0	0,757
10,0	486,2	1,22	1,024	418,5	68,6	0,765
20,0	502,1	1,28	1,036	429,4	70,0	0,781
30,0	519,7	1,33	1,039	441,7	71,4	0,798
40,0	538,5	1,39	1,034	455,2	72,9	0,814
50,0	558,3	1,45	1,024	469,6	74,5	0,830
60,0	578,7	1,52	1,009	484,4	76,1	0,846

$T=1100\text{ K}$

0,1	494,6	1,18	1,000	437,8	73,6	0,749
1,0	495,8	1,18	1,002	438,4	73,7	0,750
5,0	501,5	1,20	1,008	441,4	74,2	0,755
10,0	509,0	1,22	1,013	445,6	74,7	0,761
20,0	525,0	1,26	1,018	455,0	76,0	0,773
30,0	542,3	1,32	1,016	465,6	77,3	0,786
40,0	560,5	1,37	1,009	477,2	78,6	0,799
50,0	579,4	1,42	0,998	489,5	80,0	0,812
60,0	598,8	1,48	0,984	502,3	81,5	0,824
70,0	618,4	1,53	0,969	515,5	82,9	0,837

$T=1200\text{ K}$

0,1	515,8	1,17	1,000	464,9	79,6	0,748
1,0	517,1	1,18	1,001	465,5	79,7	0,749
4,0	521,5	1,19	1,003	467,5	80,0	0,752
5,0	523,0	1,19	1,004	468,1	80,1	0,753
10,0	530,6	1,21	1,006	471,8	80,6	0,757
20,0	546,6	1,26	1,006	480,0	81,7	0,767
30,0	563,6	1,30	1,000	489,2	82,9	0,777
40,0	581,3	1,35	0,991	499,3	84,2	0,787
50,0	599,5	1,40	0,980	510,1	85,5	0,798
60,0	618,1	1,45	0,966	521,3	86,8	0,808
70,0	636,8	1,50	0,951	532,9	88,1	0,818
80,0	655,6	1,55	0,936	544,7	89,4	0,828

$T=1300\text{ K}$

0,1	536,3	1,17	1,000	491,1	85,3	0,747
1,0	537,6	1,17	1,000	491,6	85,4	0,748
5,0	543,6	1,19	1,001	494,0	85,8	0,751
10,0	551,2	1,21	1,001	497,2	86,3	0,754
20,0	567,2	1,25	0,997	504,4	87,3	0,762

Диоксид углерода

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
30,0	584,0	1,29	0,989	512,5	88,4	0,770
40,0	601,2	1,33	0,979	521,4	89,6	0,779
50,0	618,8	1,38	0,967	530,9	90,8	0,787
60,0	636,7	1,42	0,953	540,8	92,0	0,795
70,0	654,7	1,47	0,939	551,1	93,2	0,804
80,0	672,8	1,51	0,924	561,6	94,4	0,812
90,0	690,8	1,56	0,910	572,3	95,6	0,820

$T=1400\text{ K}$

0,1	556,0	1,17	1,000	516,5	90,9	0,747
1,0	557,3	1,17	1,000	516,9	90,9	0,747
5,0	563,3	1,19	0,999	519,0	91,3	0,749
10,0	571,0	1,20	0,997	521,8	91,8	0,752
20,0	586,9	1,24	0,991	528,2	92,8	0,758
30,0	603,4	1,28	0,981	535,4	93,8	0,765
40,0	620,2	1,32	0,970	543,3	94,9	0,772
50,0	637,4	1,36	0,958	551,8	95,9	0,778
60,0	654,7	1,40	0,944	560,6	97,1	0,785
70,0	672,1	1,44	0,930	569,8	98,2	0,792
80,0	689,6	1,48	0,916	579,2	99,3	0,800
90,0	706,9	1,52	0,902	588,9	100,4	0,807
100,0	724,2	1,56	0,888	598,6	101,5	0,814

$T=1500\text{ K}$

0,1	575,0	1,17	1,000	541,1	96,2	0,746
1,0	576,3	1,17	1,000	541,5	96,3	0,746
5,0	582,4	1,18	0,997	543,3	96,7	0,748
10,0	590,1	1,20	0,994	545,8	97,1	0,750
20,0	605,9	1,24	0,986	551,5	98,0	0,755
30,0	622,1	1,27	0,976	558,0	99,0	0,760
40,0	638,6	1,31	0,964	565,0	100,0	0,766
50,0	655,3	1,35	0,951	572,6	101,0	0,772
60,0	672,1	1,38	0,938	580,5	102,0	0,777
70,0	689,0	1,42	0,924	588,8	103,1	0,783
80,0	705,9	1,46	0,910	597,3	104,1	0,789
90,0	722,7	1,50	0,896	606,0	105,2	0,795
100,0	739,5	1,53	0,883	614,9	106,2	0,801

$T=1750\text{ K}$

0,1	620,1	1,16	1,000	599,8	109,0	0,744
1,0	621,4	1,17	0,999	600,1	109,1	0,744
5,0	627,4	1,18	0,995	601,5	109,4	0,745
10,0	635,0	1,19	0,990	603,4	109,8	0,746
20,0	650,4	1,22	0,979	607,7	110,6	0,749
30,0	666,0	1,26	0,967	612,6	111,4	0,752
40,0	681,7	1,29	0,955	618,0	112,3	0,756
50,0	697,5	1,32	0,942	623,8	113,1	0,759
60,0	713,3	1,35	0,928	630,0	114,0	0,763
70,0	729,2	1,38	0,915	636,5	114,9	0,767
80,0	745,0	1,41	0,902	643,3	115,8	0,771
90,0	760,0	1,45	0,889	650,2	116,7	0,775
100,0	776,4	1,48	0,876	657,3	117,6	0,779
120,0	807,3	1,54	0,852	671,8	119,5	0,788

Диоксид углерода

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
<i>T=2000 K</i>						
0,1	662,1	1,16	1,000	655,2	120,9	0,743
1,0	663,4	1,16	0,999	655,4	121,0	0,743
5,0	669,3	1,17	0,994	656,5	121,3	0,743
10,0	676,8	1,19	0,988	657,9	121,6	0,744
20,0	691,7	1,21	0,976	661,2	122,3	0,745
30,0	706,7	1,24	0,963	665,0	123,1	0,747
40,0	721,7	1,27	0,951	669,3	123,8	0,749
50,0	736,8	1,30	0,938	673,9	124,6	0,751
60,0	751,8	1,33	0,925	678,8	125,4	0,754
70,0	766,9	1,35	0,912	684,0	126,2	0,756
80,0	781,8	1,38	0,900	689,4	127,0	0,759
90,0	796,7	1,41	0,887	695,0	127,8	0,762
100,0	811,5	1,43	0,875	700,8	128,6	0,765
120,0	840,8	1,49	0,852	712,7	130,2	0,771
140,0	869,5	1,54	0,830	725,1	131,8	0,777
<i>T=2250 K</i>						
0,1	701,7	1,16	1,000	707,9	132,2	0,742
1,0	703,0	1,16	0,999	708,1	132,3	0,742
5,0	708,7	1,17	0,994	708,9	132,6	0,742
10,0	715,9	1,18	0,988	710,0	132,9	0,742
20,0	730,4	1,21	0,975	712,5	133,5	0,743
30,0	744,8	1,23	0,962	715,5	134,2	0,744
40,0	759,3	1,26	0,949	718,8	134,9	0,745
50,0	773,7	1,28	0,937	722,5	135,6	0,746
60,0	788,1	1,31	0,924	726,5	136,3	0,748
70,0	802,5	1,33	0,912	730,7	137,0	0,749
80,0	816,8	1,36	0,900	735,1	137,7	0,751
90,0	830,9	1,38	0,888	739,7	138,4	0,753
100,0	845,0	1,40	0,877	744,4	139,1	0,755
120,0	872,9	1,45	0,855	754,4	140,6	0,759
140,0	900,3	1,50	0,834	764,8	142,0	0,764
160,0	927,2	1,54	0,815	775,5	143,4	0,768
<i>T=2500 K</i>						
0,1	739,2	1,16	1,000	758,5	143,0	0,741
1,0	740,4	1,16	0,999	758,6	143,1	0,741
5,0	746,0	1,17	0,994	759,2	143,3	0,741
10,0	753,0	1,18	0,987	760,0	143,6	0,741
20,0	767,0	1,20	0,975	762,0	144,2	0,741
30,0	781,0	1,22	0,962	764,3	144,8	0,741
40,0	794,9	1,25	0,950	766,9	145,4	0,742
50,0	808,8	1,27	0,938	769,9	146,0	0,742
60,0	822,6	1,29	0,926	773,1	146,7	0,743
70,0	836,4	1,31	0,914	776,5	147,3	0,744
80,0	850,0	1,34	0,902	780,1	147,9	0,745
90,0	863,7	1,36	0,891	783,9	148,6	0,747
100,0	877,2	1,38	0,880	787,9	149,2	0,748
120,0	903,9	1,42	0,859	796,2	150,6	0,751
140,0	930,2	1,46	0,839	805,0	151,9	0,754
160,0	956,0	1,50	0,821	814,1	153,2	0,758
180,0	981,3	1,54	0,803	823,5	154,5	0,761

5.2. Гексафторид серы

Экспериментальные данные о факторе сжимаемости гексафторида серы охватывают жидкую и газовую фазы в интервале температур 233—523 К при давлениях до 52 МПа (рис. 5.2).

Результаты измерения сжимаемости гексафторида серы в газообразном состоянии приведены в работах [154—157]. В табл. 5.4 даны краткие сведения об этих работах.

Таблица 5.4. Экспериментальные исследования сжимаемости гексафторида серы в газообразном состоянии

ΔT , К	Δp , МПа	Авторы	Литература
307—404	2,3—11	Клетт, Роулинсон, Ситтен (1955)	[154]
313—501	2—13	Елема (1970)	[155]
298—363	1,1—7,9	Мирс, Розенталь, Синка (1969)	[156]
233—473	0,4—52	Жердев, Улыбин (1973)	[157]

Погрешность экспериментальных данных [154, 156, 157] составляет 0,25, [155]—0,5%. Невысокая точность данных [155] объясняется, очевидно, главным образом наличием примесей.

Уравнение состояния гексафторида серы получено в виде вириального уравнения (1.3). Для определения констант уравнения использована методика, изложенная в § 1.4. Обработано 60 экспериментальных точек по сжимаемости в интервалах $p=0 \div 300$ кг/м³ и $T=300 \div 523$ К.

Применение потенциала Леннарда-Джонса (12-6) в качестве модельного для гексафторида серы не дало высокой точности аппроксимации экспериментальных данных уравнением состояния. Средняя квадратическая погрешность аппроксимации составила 1,08%. При этом получены следующие значения констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $b_0=1,2646 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\epsilon/k=229,44$ К.

Низкая точность аппроксимации, очевидно, связана не только с невысокой точностью экспериментальных данных, но и с тем, что для гексафторида серы двухпараметрический потенциал Леннарда-Джонса (12-6) не является достаточно подходящим в качестве модельного потенциала, отображающего взаимодействие молекул. В связи с этим получено уравнение состояния гексафторида серы на основе трехпараметрического потенциала сферической оболочки.

При значении третьего параметра потенциала $r_0^*=1,7$ второй, третий и четвертый приведенные вириальные коэффициенты, рассчитанные в [6—8], аппроксимированы полиномами вида (2.1)—(2.3) в интервалах приведенных температур соответственно: $T^*=0,25 \div 10$; $T^*=0,7 \div 10$ и $T^*=0,55 \div 10$. Константы аппроксимации приведенных вириальных коэффициентов имеют следующие значения:

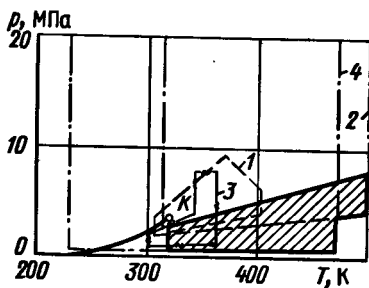


Рис. 5.2. Область обработки экспериментальных данных о сжимаемости гексафторида серы в газообразном состоянии: 1—[154]; 2—[155]; 3—[156]; 4—[157]

$$\begin{aligned}
a_0 &= 6,52946492 \cdot 10^{-1} \\
a_1 &= -3,32513716 \cdot 10^{-1} \\
a_2 &= -2,50618637 \cdot 10^0 \\
a_3 &= 4,29933044 \cdot 10^0 \\
a_4 &= -5,30336461 \cdot 10^0 \\
a_5 &= 4,03698005 \cdot 10^0 \\
a_6 &= -1,91685097 \cdot 10^0 \\
a_7 &= 5,42997719 \cdot 10^{-1} \\
a_8 &= -8,32234351 \cdot 10^{-2} \\
a_9 &= 5,17457557 \cdot 10^{-3} \\
a_{10} &= 2,16139816 \cdot 10^{-5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_0 &= 2,20430973 \cdot 10^{-1} \\
c_1 &= 1,19182739 \cdot 10^0 \\
c_2 &= -9,56339473 \cdot 10^0 \\
c_3 &= 3,31494391 \cdot 10^1 \\
c_4 &= -6,47477172 \cdot 10^1 \\
c_5 &= 7,58541475 \cdot 10^1 \\
c_6 &= -5,21232355 \cdot 10^1 \\
c_7 &= 1,92975167 \cdot 10^1 \\
c_8 &= -2,97665617 \cdot 10^0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_0 &= -6,71149354 \cdot 10^{-3} \\
d_1 &= 2,23799643 \cdot 10^0 \\
d_2 &= -1,68938389 \cdot 10^1 \\
d_3 &= 6,73123287 \cdot 10^1 \\
d_4 &= -1,58880777 \cdot 10^2 \\
d_5 &= 2,29843651 \cdot 10^2 \\
d_6 &= -2,05930519 \cdot 10^2 \\
d_7 &= 1,11259266 \cdot 10^2 \\
d_8 &= -3,29611534 \cdot 10^1 \\
d_9 &= 4,06815971 \cdot 10^0
\end{aligned}$$

В результате обработки данных о коэффициенте сжимаемости методом наименьших квадратов получены параметры потенциала сферической оболочки для гексафторида серы. Отметим, что в качестве параметра приведения вириальных коэффициентов используется $b_0 = 2/3 N\pi r_0^3$.

Средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных уравнением состояния, основанном на применении потенциала сферической оболочки, составила 0,36%, т. е. значительно ниже, чем погрешность уравнения, основанного на потенциале Леннарда-Джонса (12-6).

Уравнение состояния, полученное с помощью потенциала сферической оболочки, использовано для расчета таблиц термодинамических свойств гексафторида серы за пределами области экспериментальных данных. Таблицы рассчитаны в интервале $T = 500 \div 1500$ К. Область давлений при расчете таблиц определяется предельной плотностью, при которой использовались экспериментальные данные о сжимаемости, т. е. $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$.

Для расчета калорических функций значения этих функций в идеально-газовом состоянии по данным [42] аппроксимированы полиномами вида (3.2). Аппроксимация произведена в интервале $T = 293,15 \div 2000$ К. Для энтальпии за начало отсчета принято состояние кристалла при 0 К. Теплота сублимации кристалла при 0 К равна $\Delta h_0^0 = 216 \text{ Дж/г}$ [37]. Константы полинома, описывающего зависимость идеально-газовой теплоемкости от температуры, получены дифференцированием по температуре полинома, описывающего энтальпию.

Ниже приводятся значения констант полиномов для расчета калорических функций гексафторида серы в идеально-газовом состоянии:

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= 1,89904619 \cdot 10^1 \\
\alpha_1 &= -2,85272897 \cdot 10^0 \\
\alpha_2 &= 1,05096736 \cdot 10^0 \\
\alpha_3 &= 2,34462222 \cdot 10^{-3} \\
\alpha_4 &= -3,08242928 \cdot 10^{-2} \\
\alpha_5 &= 3,18647161 \cdot 10^{-3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\beta_0 &= 1,89904619 \cdot 10^1 \\
\beta_1 &= 0 \\
\beta_2 &= -1,05096726 \cdot 10^0 \\
\beta_3 &= -4,68924444 \cdot 10^{-2} \\
\beta_4 &= 9,24728784 \cdot 10^{-2} \\
\beta_5 &= -1,27458864 \cdot 10^{-2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_0 &= 9,83876192 \cdot 10^1 \\
\gamma_1 &= -1,02677786 \cdot 10^2 \\
\gamma_2 &= 1,11787557 \cdot 10^2 \\
\gamma_3 &= -8,36601357 \cdot 10^1 \\
\gamma_4 &= 3,99038372 \cdot 10^1 \\
\gamma_5 &= -1,15048327 \cdot 10^1 \\
\gamma_6 &= 1,81946272 \cdot 10^0 \\
\gamma_7 &= -1,29779694 \cdot 10^{-1}
\end{aligned}$$

Полученные выше результаты показали, что задача экстраполяции за пределы экспериментально изученной области для гексафторида серы может быть более успешно решена при использовании потенциала сферической оболочки. Равновесные свойства рассчитаны по уравнению состояния, основанному именно на этом потенциале. Однако для потенциала сферической оболочки не рассчитаны вязкостные и теплопроводностные вириальные коэффициенты. В связи с этим для расчета неравновесных свойств гексафторида серы применен потенциал Леннарда-Джонса (12-6).

Получены согласованные уравнения сжимаемости и вязкости гексафторида серы по методике, изложенной в первой главе. Обработаны совместно данные о

сжимаемости, перечисленные выше, и данные о вязкости при атмосферном и повышенном давлении.

Вязкость при давлении, близком к атмосферному, измерена в работе Эллиса и Роу [158] при температурах 473—1123 К и в работе Дау с соавторами [159] при температурах 293—873 К. Авторы оценивают погрешность данных в 1%. Однако данные [158] лежат систематически выше данных [159], причем расхождение увеличивается с ростом температуры и при $T=800$ К достигает 3,5%.

Вязкость шестифтористой серы при повышенных давлениях измерена в [160]. Исследования проведены при температурах от 298 до 523 К и давлениях до 4 МПа. Погрешность эксперимента оценивается авторами в 1,1%.

Обработаны 60 экспериментальных значений сжимаемости, 33 и 19 значений вязкости при атмосферном и повышенном давлении. Получены параметры потенциала Леннарда-Джонса (12-6). Средняя квадратическая погрешность описания данных о сжимаемости $\delta z=1,132\%$, о вязкости $\delta \eta=1,839\%$.

Значения констант потенциала Леннарда-Джонса (12-6), полученные в результате суммарной обработки данных о сжимаемости и вязкости гексафторида серы, мало отличаются от констант, полученных при обработке только данных о вязкости. Эти константы использованы для расчета таблиц неравновесных свойств.

Вязкость и теплопроводность при атмосферном давлении рассчитаны соответственно по уравнению Чепмена-Энскога (1.24) и уравнению Мончика (1.27). Константы зависимости $f_{\eta}^{(3)}/\Omega^{(2.2)*}=f(T^*)$ использованы те же, что и в § 1.5. Значения $\beta_0(T^*)$ для гексафторида серы рассчитаны и представлены в виде

$$\text{полинома } \beta_0 = \sum_{i=1}^5 m_i (\varepsilon/(kT))^{s_i}.$$

Вязкость и теплопроводность при повышенном давлении рассчитаны по вириальным уравнениям вида (1.25). Константы полиномов, аппроксимирующих вириальные коэффициенты B'_{η} , C'_{η} и C'_{λ} , приведены в § 2.1. Значения второго теплопроводного вириального коэффициента для гексафторида серы рассчитаны по [22], и комплекс B'_{λ} аппроксимирован полиномом $B_{\lambda} = \sum_{j=1}^4 p_j (\varepsilon/(kT))^{s_j}$.

Приводим константы аппроксимации и соответствующие степени при аргументах для β_0 и B_{λ} :

$m_1 = -1,35190 \cdot 10^1$	$s_1 = 5$	$p_1 = 1,16020 \cdot 10^0$	$s_1 = 1,5$
$m_2 = 2,66930 \cdot 10^1$	$s_2 = 4$	$p_2 = -4,64070 \cdot 10^0$	$s_2 = 1,0$
$m_3 = -1,53360 \cdot 10^1$	$s_3 = 3$	$p_3 = 3,57760 \cdot 10^0$	$s_3 = 0,5$
$m_4 = -1,86440 \cdot 10^0$	$s_4 = 1$	$p_4 = -2,73120 \cdot 10^{-1}$	$s_4 = 0$
$m_5 = 6,79590 \cdot 10^0$	$s_5 = 0$		

В процессе обработки экспериментальных данных и расчета таблиц теплофизических свойств гексафторида серы использованы следующие физические константы:

масса моля $\mu = 146,06$ г/моль;
газовая постоянная $R = 56,923$ Дж/(кг·К);
теплота сублимации при 0 К $\Delta h_0^0 = 216000$ Дж/кг;
параметры потенциала ss: $r_0^* = 1,7$; $b_0 = 1,120 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $\varepsilon/k = 445,70$ К;
единицы параметров потенциала Леннарда-Джонса (12-6): $\varepsilon/k = 233,219630$ К;
 $b_0 = 1,1817003 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Результаты расчетов теплофизических свойств гексафторида серы содержатся в табл. 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5. Гексафторид серы

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
$T=500\text{ K}$						
0,1	3,52	0,9984	491,8	2,402	0,825	0,882
1,0	35,71	0,9839	489,9	2,268	0,826	0,890
2,0	72,56	0,9684	487,7	2,225	0,828	0,900
3,0	110,52	0,9537	485,5	2,199	0,830	0,910
4,0	149,52	0,9398	483,3	2,179	0,832	0,921
5,0	189,48	0,9270	481,1	2,163	0,833	0,932
6,0	230,25	0,9155	478,9	2,149	0,835	0,944
$T=600\text{ K}$						
0,1	2,93	0,9994	582,8	2,568	0,877	0,934
1,0	29,44	0,9944	581,5	2,435	0,878	0,939
2,0	59,17	0,9895	580,0	2,393	0,879	0,945
3,0	89,15	0,9852	578,6	2,368	0,880	0,950
4,0	119,31	0,9815	577,2	2,349	0,881	0,956
5,0	149,59	0,9786	575,8	2,335	0,881	0,961
6,0	179,91	0,9763	574,4	2,322	0,882	0,967
8,0	240,43	0,9741	571,8	2,302	0,884	0,978
$T=700\text{ K}$						
0,1	2,51	0,9999	678,1	2,715	0,912	0,969
1,0	25,10	0,9996	677,2	2,583	0,912	0,972
2,0	50,20	0,9997	676,2	2,542	0,913	0,976
3,0	75,26	1,0002	675,2	2,517	0,914	0,979
4,0	100,25	1,0012	674,2	2,499	0,914	0,983
5,0	125,14	1,0027	673,2	2,485	0,915	0,986
6,0	149,88	1,0046	672,3	2,474	0,915	0,990
8,0	198,82	1,0097	670,5	2,454	0,916	0,997
10,0	246,83	1,0167	668,9	2,439	0,917	1,003
$T=800\text{ K}$						
0,1	2,20	1,0002	776,3	2,846	0,936	0,993
1,0	21,91	1,0024	775,6	2,714	0,936	0,996
2,0	43,69	1,0051	774,9	2,674	0,937	0,998
3,0	65,34	1,0081	774,2	2,650	0,937	1,000
4,0	86,84	1,0114	773,5	2,632	0,938	1,003
5,0	108,16	1,0150	772,9	2,619	0,938	1,005
6,0	129,29	1,0190	772,2	2,607	0,938	1,008
8,0	170,91	1,0278	771,0	2,589	0,939	1,012
10,0	211,59	1,0377	769,9	2,574	0,939	1,017
$T=900\text{ K}$						
0,1	1,95	1,0004	876,5	2,964	0,953	1,011
1,0	19,44	1,0039	876,1	2,832	0,954	1,012
2,0	38,72	1,0080	875,6	2,792	0,954	1,014
3,0	57,84	1,0124	875,1	2,768	0,954	1,016
4,0	76,77	1,0169	874,6	2,751	0,954	1,018
5,0	95,51	1,0217	874,1	2,738	0,955	1,019
6,0	114,06	1,0267	873,7	2,727	0,955	1,021
8,0	150,52	1,0373	872,9	2,709	0,955	1,025
10,0	186,11	1,0487	872,1	2,695	0,956	1,028
12,0	220,78	1,0608	871,4	2,683	0,956	1,031

Гексафторид серы

<i>p</i>	ρ	<i>z</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>c_v</i>	<i>c_p</i>
<i>T</i> = 1000 K						
0,1	1,76	1,0005	978,3	3,071	0,966	1,023
1,0	17,48	1,0047	977,9	2,940	0,966	1,025
2,0	34,80	1,0096	977,6	2,899	0,967	1,026
3,0	51,93	1,0147	977,3	2,876	0,967	1,027
4,0	68,89	1,0199	977,0	2,859	0,967	1,029
5,0	85,66	1,0253	976,7	2,845	0,967	1,030
6,0	102,24	1,0308	976,4	2,835	0,967	1,032
8,0	134,82	1,0423	975,8	2,817	0,968	1,034
10,0	166,60	1,0544	975,4	2,803	0,968	1,037
12,0	197,56	1,0670	974,9	2,792	0,968	1,039
14,0	227,71	1,0800	974,6	2,782	0,969	1,041
<i>T</i> = 1100 K						
0,1	1,60	1,0005	1081,1	3,169	0,976	1,033
1,0	15,89	1,0052	1080,9	3,037	0,976	1,034
2,0	31,61	1,0105	1080,7	2,997	0,976	1,035
3,0	47,16	1,0159	1080,5	2,974	0,976	1,036
4,0	62,53	1,0215	1080,3	2,957	0,976	1,037
5,0	77,73	1,0272	1080,1	2,944	0,977	1,038
6,0	92,76	1,0329	1079,9	2,933	0,977	1,039
8,0	122,27	1,0448	1079,6	2,916	0,977	1,042
10,0	151,06	1,0571	1079,4	2,902	0,977	1,043
12,0	179,13	1,0697	1079,2	2,891	0,978	1,045
14,0	206,49	1,0827	1079,0	2,881	0,978	1,047
16,0	233,13	1,0960	1078,9	2,873	0,978	1,049
<i>T</i> = 1200 K						
0,1	1,46	1,0005	1184,8	3,259	0,983	1,040
1,0	14,56	1,0054	1184,7	3,128	0,983	1,041
2,0	28,96	1,0109	1184,5	3,088	0,984	1,042
3,0	43,20	1,0165	1184,4	3,064	0,984	1,043
4,0	57,28	1,0222	1184,4	3,047	0,984	1,044
5,0	71,20	1,0280	1184,3	3,034	0,984	1,045
6,0	84,95	1,0338	1184,2	3,024	0,984	1,046
8,0	111,98	1,0458	1184,1	3,006	0,984	1,047
10,0	138,35	1,0581	1184,0	2,993	0,985	1,049
12,0	164,08	1,0706	1184,0	2,982	0,985	1,051
14,0	189,17	1,0833	1184,0	2,973	0,985	1,052
16,0	213,64	1,0963	1184,0	2,964	0,985	1,053
18,0	237,48	1,1095	1184,1	2,957	0,985	1,055
<i>T</i> = 1300 K						
0,1	1,35	1,0005	1289,1	3,343	0,989	1,046
1,0	13,44	1,0055	1289,1	3,211	0,989	1,047
2,0	26,73	1,0111	1289,1	3,171	0,989	1,048
3,0	39,87	1,0167	1289,0	3,148	0,990	1,048
4,0	52,86	1,0224	1289,0	3,131	0,990	1,049
5,0	65,71	1,0282	1289,0	3,118	0,990	1,050
6,0	78,40	1,0340	1289,0	3,108	0,990	1,051
8,0	103,35	1,0459	1289,1	3,091	0,990	1,052
10,0	127,72	1,0580	1289,1	3,077	0,990	1,053
12,0	151,50	1,0702	1289,2	3,066	0,990	1,055

Гексафторид серы

p	ρ	z	h	s	c_v	c_p
14,0	174,72	1,0827	1289,4	3,057	0,991	1,056
16,0	197,38	1,0953	1289,5	3,049	0,991	1,057
18,0	219,49	1,1081	1289,7	3,042	0,991	1,058
20,0	241,07	1,1210	1289,9	3,035	0,991	1,059
$T=1400\text{ K}$						
0,1	1,25	1,0005	1394,0	3,420	0,994	1,051
1,0	12,48	1,0055	1394,0	3,289	0,994	1,052
2,0	24,82	1,0110	1394,1	3,249	0,994	1,052
3,0	37,02	1,0166	1394,1	3,226	0,994	1,053
4,0	49,09	1,0223	1394,2	3,209	0,994	1,053
5,0	61,03	1,0280	1394,2	3,196	0,994	1,054
6,0	72,82	1,0338	1394,3	3,186	0,994	1,055
8,0	96,01	1,0454	1394,5	3,169	0,995	1,056
10,0	118,68	1,0572	1394,7	3,156	0,995	1,057
12,0	140,82	1,0692	1394,9	3,145	0,995	1,058
14,0	162,44	1,0813	1395,1	3,136	0,995	1,059
16,0	183,57	1,0936	1395,4	3,127	0,995	1,060
18,0	204,21	1,1059	1395,7	3,120	0,995	1,061
20,0	224,38	1,1184	1396,0	3,114	0,996	1,062
$T=1500\text{ K}$						
0,1	1,17	1,0005	1499,3	3,493	0,998	1,055
1,0	11,65	1,0054	1499,4	3,362	0,998	1,055
2,0	23,17	1,0109	1499,5	3,322	0,998	1,056
3,0	34,56	1,0164	1499,6	3,299	0,998	1,056
4,0	45,83	1,0220	1499,7	3,282	0,998	1,057
5,0	56,98	1,0276	1499,8	3,269	0,998	1,057
6,0	68,00	1,0332	1499,9	3,259	0,998	1,058
8,0	89,68	1,0446	1500,2	3,242	0,998	1,059
10,0	110,88	1,0562	1500,5	3,229	0,999	1,060
12,0	131,60	1,0678	1500,8	3,218	0,999	1,061
14,0	151,87	1,0795	1501,2	3,209	0,999	1,062
16,0	171,68	1,0914	1501,6	3,201	0,999	1,063
18,0	191,05	1,1033	1501,9	3,194	0,999	1,064
20,0	209,99	1,1153	1502,3	3,187	0,999	1,064

Таблица 5.6. Гексафторид серы

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
$T=500\text{ K}$						
0,1	174,2	1,07	1,008	246,2	28,0	0,776
1,0	172,3	1,06	1,077	250,8	28,1	0,795
2,0	170,4	1,05	1,159	256,6	28,2	0,818
3,0	168,8	1,05	1,243	263,3	28,4	0,845
4,0	167,4	1,05	1,328	270,9	28,5	0,875
5,0	166,4	1,05	1,414	279,4	28,7	0,907
6,0	165,8	1,06	1,498	288,9	28,9	0,942

Гексафторид серы

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	Pr
----------	----------	----------	-------------------	--------	-----------	----

T=600 K

0,1	190,7	1,06	1,004	285,6	34,5	0,774
1,0	190,1	1,06	1,043	289,4	34,6	0,786
2,0	189,7	1,06	1,086	294,0	34,7	0,801
3,0	189,5	1,07	1,127	299,2	34,8	0,817
4,0	189,5	1,07	1,168	304,8	35,0	0,833
5,0	189,7	1,08	1,206	310,9	35,1	0,851
6,0	190,1	1,08	1,243	317,4	35,3	0,870
8,0	191,7	1,10	1,309	331,8	35,6	0,911

T=700 K

0,1	205,8	1,06	1,003	322,0	40,4	0,773
1,0	206,0	1,07	1,026	325,2	40,5	0,781
2,0	206,4	1,07	1,050	329,0	40,6	0,791
3,0	207,0	1,07	1,074	333,1	40,7	0,801
4,0	207,6	1,08	1,096	337,5	40,9	0,812
5,0	208,5	1,09	1,117	342,2	41,0	0,824
6,0	209,4	1,10	1,137	347,2	41,1	0,836
8,0	211,8	1,11	1,171	358,0	41,4	0,861
10,0	214,7	1,14	1,198	369,7	41,8	0,888

T=800 K

0,1	219,9	1,06	1,002	356,1	45,9	0,771
1,0	220,6	1,07	1,016	358,8	46,0	0,777
2,0	221,5	1,07	1,031	361,9	46,1	0,784
3,0	222,4	1,08	1,045	365,4	46,2	0,792
4,0	223,5	1,08	1,058	369,0	46,3	0,799
5,0	224,7	1,09	1,070	372,8	46,4	0,808
6,0	226,0	1,10	1,081	376,8	46,5	0,816
8,0	228,9	1,12	1,100	385,4	46,8	0,834
10,0	232,1	1,14	1,115	394,7	47,1	0,852

T=900 K

0,1	233,1	1,06	1,001	388,2	51,0	0,770
1,0	234,1	1,07	1,010	390,5	51,0	0,775
2,0	235,3	1,07	1,019	393,2	51,1	0,780
3,0	236,6	1,08	1,028	396,1	51,2	0,785
4,0	237,9	1,09	1,036	399,2	51,3	0,791
5,0	239,3	1,09	1,043	402,4	51,5	0,797
6,0	240,8	1,10	1,049	405,7	51,6	0,803
8,0	244,0	1,12	1,059	412,8	51,8	0,816
10,0	247,4	1,14	1,067	420,4	52,1	0,830
12,0	251,1	1,16	1,072	428,5	52,3	0,844

T=1000 K

0,1	245,7	1,06	1,001	418,8	55,7	0,769
1,0	246,8	1,07	1,006	420,7	55,8	0,772
2,0	248,2	1,07	1,012	423,1	55,9	0,777
3,0	249,7	1,08	1,017	425,6	56,0	0,781
4,0	251,2	1,09	1,021	428,2	56,1	0,785
5,0	252,7	1,09	1,025	430,9	56,2	0,790

Гексафторид серы

p	a	k	α/α_0	η	λ	Pr
6,0	254,3	1,10	1,028	433,8	56,3	0,795
8,0	257,7	1,12	1,034	439,8	56,5	0,805
10,0	261,3	1,14	1,037	446,2	56,8	0,815
12,0	265,0	1,16	1,039	453,0	57,0	0,826
14,0	268,9	1,18	1,039	460,1	57,2	0,837

$T=1100\text{ K}$

0,1	257,6	1,06	1,000	447,9	60,3	0,768
1,0	258,9	1,06	1,004	449,7	60,3	0,771
2,0	260,4	1,07	1,007	451,7	60,4	0,774
3,0	262,0	1,08	1,009	453,9	60,5	0,777
4,0	263,6	1,09	1,012	456,2	60,6	0,781
5,0	265,2	1,09	1,013	458,6	60,7	0,784
6,0	266,9	1,10	1,015	461,0	60,8	0,788
8,0	270,4	1,12	1,017	466,2	61,0	0,796
10,0	274,1	1,13	1,017	471,8	61,2	0,804
12,0	277,8	1,15	1,017	477,6	61,4	0,813
14,0	281,7	1,17	1,015	483,7	61,6	0,822
16,0	285,6	1,19	1,013	490,1	61,9	0,831

$T=1200\text{ K}$

0,1	269,0	1,06	1,000	475,9	64,6	0,767
1,0	270,4	1,06	1,002	477,5	64,6	0,769
2,0	272,0	1,07	1,003	479,3	64,7	0,772
3,0	273,6	1,08	1,004	481,2	64,8	0,775
4,0	275,3	1,09	1,005	483,2	64,9	0,777
5,0	277,0	1,09	1,005	485,3	65,0	0,780
6,0	278,8	1,10	1,006	487,5	65,1	0,783
8,0	282,3	1,12	1,005	492,0	65,3	0,790
10,0	286,0	1,13	1,004	496,9	65,5	0,796
12,0	289,8	1,15	1,002	502,0	65,6	0,803
14,0	293,6	1,17	0,999	507,3	65,9	0,810
16,0	297,6	1,18	0,995	512,8	66,1	0,818
18,0	301,5	1,20	0,991	518,5	66,3	0,825

$T=1300\text{ K}$

0,1	279,9	1,06	1,000	503,0	68,7	0,766
1,0	281,4	1,06	1,000	504,3	68,8	0,768
2,0	283,1	1,07	1,001	506,0	68,8	0,770
3,0	284,8	1,08	1,001	507,7	68,9	0,772
4,0	286,5	1,08	1,000	509,4	69,0	0,775
5,0	288,2	1,09	1,000	511,3	69,1	0,777
6,0	290,0	1,10	0,999	513,2	69,2	0,780
8,0	293,6	1,11	0,997	517,2	69,3	0,785
10,0	297,3	1,13	0,994	521,5	69,5	0,790
12,0	301,1	1,14	0,991	526,0	69,7	0,796
14,0	304,9	1,16	0,987	530,7	69,9	0,802
16,0	308,8	1,18	0,983	535,5	70,1	0,808
18,0	312,7	1,19	0,978	540,6	70,3	0,814
20,0	316,7	1,21	0,973	545,8	70,5	0,820

$T=1400\text{ K}$

0,1	290,5	1,06	1,000	529,1	72,7	0,765
1,0	292,0	1,06	1,000	530,3	72,7	0,767

Гексафторид серы

<i>p</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	α/α_0	η	λ	<i>Pr</i>
2,0	293,7	1,07	0,999	531,8	72,8	0,769
3,0	295,4	1,08	0,998	533,3	72,9	0,770
4,0	297,1	1,08	0,997	534,9	73,0	0,772
5,0	298,9	1,09	0,996	536,5	73,0	0,774
6,0	300,7	1,10	0,994	538,2	73,1	0,776
8,0	304,3	1,11	0,991	541,8	73,3	0,781
10,0	308,0	1,13	0,988	545,6	73,4	0,785
12,0	311,8	1,14	0,984	549,6	73,6	0,790
14,0	315,6	1,16	0,979	553,8	73,8	0,795
16,0	319,4	1,17	0,974	558,1	74,0	0,800
18,0	323,3	1,19	0,969	562,6	74,1	0,805
20,0	327,2	1,20	0,964	567,2	74,3	0,810
<i>T=1500 K</i>						
0,1	300,6	1,06	1,000	554,5	76,5	0,765
1,0	302,1	1,06	0,999	555,6	76,6	0,766
2,0	303,9	1,07	0,998	556,9	76,6	0,767
3,0	305,6	1,08	0,996	558,2	76,7	0,769
4,0	307,4	1,08	0,994	559,6	76,8	0,770
5,0	309,2	1,09	0,993	561,1	76,8	0,772
6,0	310,9	1,10	0,991	562,6	76,9	0,774
8,0	314,6	1,11	0,987	565,8	77,1	0,777
10,0	318,3	1,12	0,983	569,2	77,2	0,781
12,0	322,0	1,14	0,978	572,8	77,4	0,785
14,0	325,8	1,15	0,973	576,5	77,6	0,789
16,0	329,6	1,17	0,968	580,4	77,7	0,793
18,0	333,4	1,18	0,963	584,4	77,9	0,798
20,0	337,2	1,19	0,957	588,5	78,1	0,802

1. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
2. Мейсон Э., Сперлинг Т. Виримальное уравнение состояния. М.: Мир, 1972.
3. Кессельман П. И. К вопросу расчета теплофизических свойств реальных газов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1964. Т. 2, № 6. С. 879—883.
4. Kell G. S., Mc Lourin G. E., Walley H. $P-V-T$ properties of water. II. Virial coefficients in the range 150—450° C // J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48, № 8. P. 3805—3813.
5. Barker J. A., Leonard P. J., Pompe A. Fourth and fifth virial coefficients // J. Chem. Phys. 1966. Vol. 44, № 11. P. 4206—4211.
6. De Rocco A. G., Hoover W. G. Second virial coefficient for the spherical shell potential // J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 4. P. 916—926.
7. Storvick T. S., Spurling T. H., De Rocco A. G. Intermolecular forces in globular molecules. IV. Additive third virial coefficients and quadrupolar corrections // J. Chem. Phys. 1967. Vol. 46, № 4. P. 1498—1506.
8. Johnson C. H. J., Pompe A., Spurling T. H. Fourth virial coefficients for globular molecules // Mol. Phys. 1973. Vol. 26, № 6. 1549—1554.
9. Midazuno T., Kihara T. Non-additive intermolecular potential in gases. I. Van der Waals interactions // J. Phys. Soc. Jap. 1956. Vol. 11. P. 1045—1049.
10. Kihara T. Intermolecular forces and equation of state of gases // Adv. Chem. Phys. 1958. Vol. 1. P. 267—307.
11. Sherwood A. K., Prausnitz J. M. Third virial coefficient for the Kihara (exp -6) and square-well potential // J. Chem. Phys. 1964. Vol. 1, № 2. P. 413—429.
12. Rosen P. The nonadditivity of the Repulsive potential of helium // J. Chem. Phys. 1953. Vol. 21. P. 1007—1012.
13. Shostak A. Interaction energy among three helium Atoms // J. Chem. Phys. 1955. Vol. 23. P. 1808—1813.
14. Jansen L. Systematic analysis of many-body interactions in molecular solids // Phys. Rev. 1962. Vol. 125, № 6. P. 1798—2002.
15. Sherwood A. K., De Rocco A. G., Mason E. A. Nonadditivity of intermolecular forces effects on the third virial coefficient // J. Chem. Phys. 1966. Vol. 44, № 8. P. 2984—2994.
16. Interatomic potentials and transport properties for neon, argon and krypton / J. Nain, R. A. Aziz, P. S. Jain, S. C. Saxena // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65, № 8. P. 3242—3249.
17. Александров А. А., Иванов А. И., Матвеев А. Б. Исследование применимости некоторых потенциалов межмолекулярного взаимодействия для расчета вязкости водяного пара // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 31, № 2. С. 328—333.
18. Севастьянов Р. М., Зыков Н. А. Коэффициенты переноса одноатомных газов в диапазоне температур от 100 до 3000 К // Инженерно-физический журнал. 1978. Т. 34, № 1. С. 118—125.
19. Кузнецов В. М. Температурная зависимость второго вязкостного виримального коэффициента // Теплофизика высоких температур, 1978. Т. 16, № 6. С. 1178—1184.
20. Зубарев В. Н., Кузнецов В. М. Уравнения для расчета коэффициентов сжимаемости и вязкости азота умеренной плотности // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 1. С. 67—74.
21. Curtiss C. F., Mc Elroy M. B., Hoffmann D. K. The transport properties of a moderately dense Lennard-Jones gas // Int. J. Engng. Sci. 1965. Vol. 3. P. 269—283.

22. Кузнецов В. М. Разработка метода совместной обработки опытных данных и применение его для получения согласованных уравнений равновесных и неравновесных свойств умеренно сжатых газов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. М., 1980.
23. Козлов А. Д., Кузнецов В. М., Мамонов Ю. В. Аналитическое отображение поведения теплофизических свойств веществ с помощью модифицированного метода наименьших квадратов // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1984. Вып. 21. С. 126—134.
24. Козлов А. Д., Кузнецов В. М., Мамонов Ю. В. Получение теоретически обоснованных уравнений состояния при персаппроксимации эмпирических уравнений // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1985. Вып. 23. С. 117—121.
25. Зубарев В. Н. Исследование термодинамических свойств водяного пара и воздуха: Автореферат дис. ... докт. техн. наук. М., 1975.
26. Saran A., Deb S. K. Effect of stretching of intermolecular potentials of diatomic molecules // Mol. Phys. 1966. Vol. 10. P. 221—224.
27. Колесниченко Е. Г., Байбуз В. Ф. О зависимости модельных потенциалов межмолекулярного взаимодействия от температуры // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 2. С. 241—243.
28. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen von Helium, Stickstoff und Argon unterhalb 0° // Z. Physik. 1924. Bd 30. S. 320—328.
29. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen einiger Gase bis 400° und ihre Bedeutung für das Gasthermometer // Z. Physik. 1924. Bd 23. S. 77—95.
30. Michels A., Wijker Hub., Wijker H. K. Isotherms of argon between 0° C and 150° C and pressures up to 2900 atmospheres // Physica. 1949. Vol. 15. P. 627—635.
31. Michels A., Levelt J. M., De Graaf W. Compressibility isotherms of argon at temperatures between -25° C and 155° C, and at densities up to 640 Amagat // Physica. 1958. Vol. 24. P. 659—671.
32. Lecocq A. Isothermes de l'Argon l'Temperatures 950° C // J. Rech. Centre Nat. rech. Sci. 1960. Vol. 55. P. 112—138.
33. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В. А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер. М.: Изд-во стандартов, 1976.
34. ГСССД 17—81. Динамическая вязкость и теплопроводность гелия, неона, аргона, криптона и ксенона при атмосферном давлении в интервале температур от нормальных точек кипения до 2500 К. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1982.
35. Вассерман А. А. О форме уравнения для расчета теплопроводности газов и жидкостей в широкой области параметров // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 6. С. 10—21.
36. Tables of thermal properties of gases / J. Hilthenrath, C. W. Beckett, W. S. Benedict and others. Washington: NBS, 1955.
37. Landolt H., Bornstein R. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomic, Geophysik und Technik. Bd 2. Berlin: Springer Verlag, 1961.
38. Beattie J. A., Brierly J. S., Barriault K. J. The compressibility of krypton. I. An equation of state for krypton and the weight of a liter of krypton // J. Chem. Phys. 1952. Vol. 20. P. 1613—1618.
39. Walley E., Schneider W. G. Krypton in the temperature range 0 to 600° C and pressure range 10 to 80 atm // Trans. ASME. 1954. Vol. 76. P. 1001—1004.
40. Trappeniers N. J., Wassenaar T., Wolkers G. J. Isotherms and thermodynamic properties of krypton at temperatures between 0° and 150° C and at densities up to 600 Amagat // Physica. 1966. Vol. 32. P. 1503—1520.
41. Сахабетдинов М. А., Алтуний В. В. Результаты статистической обработки экспериментальных данных о теплофизических свойствах жидкого и газообразного криптона // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1980. Вып. 14. с. 32—51.
42. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Л. В. Гурвич, Г. А. Хачкурузов, В. А. Медведев и др. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
43. Beattie J. A., Barriault R. J., Brierly J. S. The compressibility of gaseous

xenon. I. An equation of state for xenon and the weight of a liter of xenon // *J. Chem. Phys.* 1951. Vol. 19, No 10. P. 1219—1221.

44. Michels A., Wassenaar T., Louwerse P. Isotherms of xenon at temperatures between 0° C and 150° C and at densities up to 515 Amagat // *Physica*. 1954. Vol. 20. P. 99—106.

45. Walley B. E., Lupien J., Shneider W. G. The compressibility of gases at high temperatures // *Canadian J. of Chem.* 1955. Vol. 33. P. 633—636.

46. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen einiger Gase // *Z. Physik*. 1925. Bd. 33. S. 1—11.

47. Michels A., Gibson K. O. Isothermenmessungen bei höheren Drucken // *Ann. Phys. Lpz.* 1928. Bd. 87. S. 850—876.

48. Nicholson G. A., Schneider W. G. Compressibility of gases at high temperatures // *Canadian J. of Chem.* 1955. Vol. 33, No 4. P. 589—594.

49. Michels A., Wassenaar T., Louwerse P. Isotherms of neon at temperatures between 0° C and 150° C and at densities up to 1100 Amagat // *Physica*. 1960. Vol. 26. P. 539—543.

50. Рабинович В. А., Токина Л. А., Березин В. М. Экспериментальное определение сжимаемости неона и аргона в интервале температур 300—720 К при давлении до 500 бар // *Теплофизика высоких температур*. 1970. Т. 8, № 4. С. 789—794.

51. Оносовский Е. В., Мороз А. М. Экспериментальные pVT -данные для неона в области температур 65—273 К и давлений до 250 бар // *Теплофизические свойства веществ и материалов*. М.: Изд-во стандартов. 1970. Вып. 2. С. 95—102.

52. Варгафтик Н. Б., Якуш Л. Б. Экспериментальное исследование теплопроводности неона, криптона, ксенона // *Теплофизические свойства газов*. М.: Наука, 1970. С. 9—13.

53. Jodu B. J., Saxena S. C. Thermal conductivity of neon from heat transfer measurements in the continuum and temperature-jump regimes // *Phys. Fluids*. 1975. Vol. 18, No 1. P. 20—32.

54. Saxena V. K., Saxena S. C. Measurement of the thermal conductivity of neon using hotwiretype thermal diffusion columns // *J. Chem. Phys.* 1968. Vol. 48, No 12. P. 5662—5667.

55. Saxena V. K., Saxena S. C. Thermal conductivity of neon in the temperatures range 400—2400 K // *Chem. Phys. Lett.* 1974. Vol. 28, No 3. P. 454—459.

56. Марченков Е. Н., Алейников В. И. Исследование теплопроводности неона и аргоно-неоновых смесей при высоких температурах // *Инженерно-физический журнал*. 1977. Т. 33, № 5. С. 848—856.

57. Springer G. S., Weingeier E. W. Thermal conductivity of neon, argon and xenon at high temperature // *J. Chem. Phys.* 1973. Vol. 59, No 6. P. 2747—2756.

58. Нестеров Н. А., Судник В. П. К вопросу о теплопроводности газообразного неона и криптона при пониженных температурах и атмосферном давлении // *Инженерно-физический журнал*. 1976. Т. 30, № 5. С. 863—867.

59. Maitland G. C., Smith E. B. Critical reassessment of viscosities of 11 common gases // *J. Chem. Engn. Data*. 1972. Vol. 17, No 2. P. 150—156.

60. Kestin J., Wakeham W., Watanabe K. Viscosity, thermal conductivity and diffusion coefficient of Ar—Ne and Ar—Kr gaseous mixtures in the temperature range 25—700° C // *J. Chem. Phys.* 1970. Vol. 53, No 10. P. 3773—3780.

61. Di Pippo R., Kestin J. Proc. 4th Symposium on Thermo—Physical Properties. College Park, 1—4 April 1968.

62. Dawe R., Smith E. B. Viscosities of the inert gases at high temperatures // *J. Chem. Phys.* 1970. Vol. 52, No 2. P. 693—703.

63. Clarke A. G., Smith E. B. Low-temperature viscosities and intermolecular forces of simple gases // *J. Chem. Phys.* 1969. Vol. 51, No 9. P. 4156—4161.

64. Guevara F. A., Stensland G. S. High temperatures viscosity ratios for neon // *Phys. Fluids*. 1971. Vol. 14, No 3. P. 746—748.

65. Kestin J., Whitlow J. H. A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method // *Physica*. 1963. Vol. 29, No 3. P. 335—356.

66. Viscosity of nitrogen, helium, neon, and argon from 78,5° to 100° C below

200 atm / G. P. Flynn, R. V. Hanks, N. A. Lemaire, J. Ross // J. Chem. Phys. 1963. Vol. 38, No 1. P. 154—162.

67. The viscosity of neon between 25° C and 75° C at pressures up to 1800 atmospheres / N. Trappeniers, A. Botzen, H. R. Van Den Berg, J. Van Oosten // Physica. 1964. Vol. 30, No 5. P. 985—996.

68. Слосарь В. П., Руденко Н. С., Третьяков В. М. Вязкость элементов нулевой группы на линии насыщения и под давлением до 5000 атм от тройных точек до 300 К // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1973. Вып. 7. С. 50—70.

69. Sengers J. V., Bolk W. F., Stigten C. J. The thermal conductivity of neon between 25° C and 75° C at pressures up to 2600 atmospheres // Physica. 1964. Vol. 30, No 5. P. 1018—1026.

70. Tufen R. Etude experimental en fonction de la temperature et de la pression de la conductivity thermique de l'ensemble de gas rares et des melanges helium—argon // These Le Gade de Docteur es Sciences Paris, 1971.

71. Голубев И. Ф., Шпагина И. Б. Теплопроводность неона при температурах от -195,3 до 47,5° C и давлениях до 500 кг/см² // Химия и технология продуктов органического синтеза. Физико-химические исследования / Тр. ГИАП. М. 1971. Вып. 8. С. 91—98.

72. Васильковская Т. Н., Голубев И. Ф. Теплопроводность неона при температурах от 295 до 566 К и давлениях от 1 до 400 бар // Химия и технология продуктов органического синтеза. Физико-химические исследования / Тр. ГИАП. 1971. Вып. 8. С. 99—101.

73. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen einiger Gase bis 400° und ihre Bedeutung für das Gasthermometer // Z. Physik. 1924. Bd 23. S. 77—94.

74. Michels A., Wouters H., De Boer J. Isotherms of nitrogen between 0° and 150° and at pressures from 20 to 80 atm // Physica. 1934. Vol. 1. P. 537—594.

75. Otto J., Michels A., Wouters H. Über Isothermen des Stickstoffes zwischen 0° und 150° bei Drucken bis zu 400 Atm. // Z. Phys. 1934. Bd 35. S. 97—101.

76. Michels A., Wouters H., De Boer J. Isotherms of nitrogen between 200 and 300 atm and 0° and 150° C. // Physica. 1936. Vol. 3. P. 585—589.

77. Saurel J. R. Appareillage pour la determination des equations d'etat des gas comprimés aux temperatures eleves application a l'atude de l'azote jusqu'a 1000 kg/cm² et 1000° C // J. Rech. Centre Nat. rech. Sci. 1958. Vol. 42. P. 21—60.

78. Canfield F. B., Leland T. W., Kobayashi R. Compressibility factors for helium—nitrogen mixtures // J. Chem. Eng. Data. 1965. Vol. 10, No 2. P. 92—96.

79. Вассерман А. А., Казавчинский Я. З., Рабинович В. А. Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. М.: Изд-во стандартов, 1968.

80. Обобщение экспериментальных данных о вязкости и теплопроводности азота, кислорода и воздуха при атмосферном давлении / А. А. Вассерман, В. А. Цымарный, Г. П. Скаморина, О. В. Светличная // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1978. Вып. 12. С. 58—86.

81. Hanley H. J. M., Ely J. F. The viscosity and thermal conductivity coefficients of dilute nitrogen and oxygen // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1973. Vol. 2, No 4. P. 735—755.

82. Kestin J., Ro S. T., Wakeham W. A. Viscosity of binary gaseous mixture helium-nitrogen // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 56, No 8. P. 4036—4042.

83. Maitland G. C., Smith E. B. Viscosities of binary gas mixtures at high temperatures // J.C.S. Faraday Trans. I. 1974. Vol. 70, No 7. P. 1191—1203.

84. Viscosities of oxygen and air a wide range of temperatures / G. P. Mathews, S. R. Thonas, A. N. Dufty, E. B. Smith // J.C.S. Faraday Trans. I. 1976. Vol. 72, No 1. P. 238—247.

85. Guevara F. A., Mc Inteer E. B., Wageman W. E. High-temperature viscosity ratios for hydrogen helium, argon and nitrogen // Phys. Fluids. 1969. Vol. 12, No 12. P. 2493—2505.

86. Лавушев А. В., Люстерник В. Е. Экспериментальное определение вязкости азота до 2000 К // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16, № 1. С. 209—210.

87. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей. М.: Физматгиз, 1959.

88. Голубев И. Ф., Гнездилов Н. Е. Вязкость газовых смесей. М.: Изд-во стандартов, 1971.
89. Тимрот Д. Л., Серединицкая М. А., Трактусева С. А. Исследование вязкости воздуха при температурах 300—270 К и давлениях 10^5 – $1,2 \cdot 10^7$ Па методом колеблющегося диска // Теплоэнергетика. 1975. № 3. С. 84–87.
90. Kestin J., Paykoc E., Sengers J. V. On the density expansion for viscosity in gases. // Physica. 1971. Vol. 54. P. 1—19.
91. Grachi J. A., Flynn G. P., Ross J. Viscosity of nitrogen, helium, hydrogen and argon from –100 to 25° C up 150–200 atm // J. Chem. Phys. 1969. Vol. 51, No 9. P. 3856–3863.
92. Kao J., Kobayashi R. Viscosity of helium and nitrogen and their mixtures at low temperatures and elevated pressures // J. Chem. Phys. 1967. Vol. 47, No 8. P. 2836–2849.
93. Michels A., Gibson R. The measurement of the viscosity of gases at high pressures. The viscosity of N_2 to 1000 atm // Proc. Roy. Soc. 1931. Vol. A 134. P. 288–294.
94. Ziebland H., Burton J. The thermal conductivity of nitrogen and argon in the liquid and gaseous states // Brit. J. Appl. Phys. 1958. Vol. 9. P. 52–63.
95. Голубев И. Ф., Кальсина М. В. Теплопроводность азота и водорода при температурах от 20 до –195° C и давлениях от 1 до 500 бар // Газовая промышленность. 1964. № 8. С. 41–43.
96. Варгафтик Н. Б., Зимина Н. Х. Теплопроводность азота при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1964. Т. 2, № 6. С. 869–878.
97. Mastovsky J., Slepicka F. Messung der Wärmeleitfähigkeit von Stickstoff und Kohlenmonoxid bei hohen Temperaturen im Stosswellenrohr // Wärme- und Stoffübertragung. 1970. Bd. 3. S. 237–243.
98. Fander F. M., Springer G. S. Measurement of the thermal conductivity of argon, krypton and nitrogen in the range 900–2000 K // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 57, No 6. P. 2333–2340.
99. Saxena S. C., Chen S. H. P. Thermal conductivity of nitrogen in the temperature range 350–2500 K // Mol. Phys. 1975. Vol. 29. P. 1507–1519.
100. Chen S., Saxena S. C. Experimental determination of thermal conductivity of nitrogen in the temperature range 100–2000° C // High. Temp. Sci. 1973. Vol. 5, No 3. P. 206–233.
101. Keyes F. G., Vines R. G. The thermal conductivity of nitrogen and argon // Trans. ASME. 1965. Vol. 87 C, No 2. P. 177–183.
102. Johannin P. Conductivité thermique de l'azote entre 75° et 700° C et jusqu'à 1000 à 1600 atmospheres // J. Rech. Centre Nat. rech. Sci. 1958. Vol. 43. P. 116–155.
103. Le Neindre B. Contribution a l'étude expérimentale de la conductivité thermique de quelques fluides a haute température et a haute pression: These de doctorat d'état ès Sciences. Paris, 1969.
104. Казавчинский Л. З., Сердюк Л. С. Единое уравнение состояния для параводорода // Теплофизические характеристики веществ. М.: Изд-во стандартов. 1970. Вып. 2. С. 29–39.
105. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen einiger Gase // Z. Physik. 1925. Bd 33. S. 1–5.
106. Bartlett E. F., Cupples H. L., Tremearne T. H. The compressibility isotherms of hydrogen, nitrogen and 3:1 mixture of the gases at temperatures between 0 and 400° and at pressures to 1000 atmospheres // J. Am. Chem. Soc. 1928. Vol. 50. P. 1275–1288.
107. Wiebe R., Gaddy V. L. The compressibility of hydrogen and of four mixtures of hydrogen and nitrogen at 0, 25, 50, 100, 200, and 300° and to 100 atmospheres // J. Am. Chem. Soc. 1938. Vol. 60. P. 2300–2303.
108. Compressibility isotherms of hydrogen and deuterium at temperatures between –175° C and +150° C / A. Michels, W. de Graaf, T. Wassenaar, M. H. Levelt, P. Louvise // Physica. 1959. Vol. 25. P. 25–42.
109. Michels H. H. Low-temperature quantum corrections to the second virial coefficient // Phys. Fluids. 1966. Vol. 9. P. 1352–1358.

110. Huberlandt R. Quantenstatistik fast klassischer Systeme mit Anwendung auf die Zustandsgleichung realer Gase // Z. Phys. Chemie 1974. Bd 255. S. 1136 – 1148.

111. ГСССД № P182—86. Параводород. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 14...1500 К и давлениях от состояния разреженного газа до 100 МПа. Таблицы рекомендуемых справочных данных / А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов, Ю. В. Мамонов и др. Деп. во ВНИИКИ 20.IV.87, № 342.

112. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

113. Amagat E. H. Edute Experimentale de l'Azote et de l'Oxygene // Ann. Chim. et Phys. 1893. Vol. 29. P. 68—80.

114. Kuypers H. A., H. Kamerlingh Onnes. Isothermes de la Oxygene a 0° et 20° C // Archives Neerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles. 1921. Vol. 5. P. 277—283.

115. Holborn L., Otto J. Über die Isothermen von Stickstoff, Sauerstoff und Helium // Z. Phys. 1922. Bd. 10. S. 367—376.

116. Michels A., Schamp H. W., De Graaf W. Compressibility isotherms of oxygen at 0° C, 25°, 50° C and at pressure up to 135 atmospheres // Physica. 1954. Vol. 20. P. 1209—1214.

117. Циклис Д. С., Куликова А. И. Определение сжимаемости кислорода при давлениях до 10 000 атм и температурах до 400° C // Журнал физической химии. 1965. Т. 39. С. 1752—1756.

118. Weber L. A. P. V — T , thermodynamic and related properties of oxygen from the triple point to 300 K at pressures to 33 MN/m² // J. Nat. Bur. Standards. 1970. Vol. 74 A. P. 93—129.

119. ГСССД 19—81. Кислород жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70...1000 К и давлениях 0,1...100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1981.

120. ГСССД 93—86. Кислород. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 70...500 К и давлениях от состояния разреженного газа до 100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1986.

121. Prydz R., Starty G. C. The thermodynamic properties of compressed gaseous and liquid fluorine // National Bureau of Standards. Technical Note 392 (Revised), 1973, September.

122. Holborn L., Schultse H. Über die Druckwage und die Isothermen von Luft, Argon und Helium zwischen 0 und 200° // Ann. Phys. 1915. Bd 47, No 4. S. 1089—1111.

123. Michels A., Wassenaar T., Von Seventer W. Isothermen of air between 0° C and 75° C and at pressures up to 2200 atm // Appl. Sci. Res. 1953. Vol. A 4. P. 52—56.

124. Baehr H. D., Schvier K. Die Thermodynamischen Eigenschaften der Luft in Temperaturbereich zwischen 210° C und 1250° C bis zu Drucken von 4500 bar. Berlin. Heidelberg, Springer-Verlag, 1961.

125. ГСССД 8-79. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 70...1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1979.

126. ГСССД 109-87. Воздух сухой. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 150...1000 К и давлениях от состояния разреженного газа до 100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1987.

127. Briner E., Biederman H. et a. Rosen. Recherches sur la compression et la decomposition de l'oxyde d'azote // Helv. Chim. Acta. 1925. Vol. 8. P. 923—928.

128. Golding B. H., Sage B. H. Volumetric behavior of nitric oxide // Ind. Eng. Chem. 1951. Vol. 43. P. 160—161.

129. Opfell J. B., Schlinger W. G., Sage B. H. Some thermodynamic properties of nitric oxide // Ind. Eng. Chem. 1954. Vol. 46. P. 189—194.

130. Scott G. A. The isotherms of H_2 , CO and their mixtures // Proc. Roy. Soc. 1929. Vol. 125 A. P. 330—344.
131. Bartlett E. P., Hetherington H. C., Kvalnes H. M. The compressibility isotherms of carbon monoxide at temperature from -70 to 200° and at pressures to 1000 atmospheres // J. Am. Chem. Soc. 1930. Vol. 52. P. 1374—1380.
132. Isotherms of carbon monoxide between 0° C and 150° C and at pressures up to 300 atmospheres / A. Michels, J. M. Lupton, T. Wassenaar, de W. Graaf // Physica. 1952. Vol. 18. P. 121—127.
133. Robertson S. L., Babb S. E. Isotherms of carbon monoxide—hydrocarbon mixtures // J. Chem. Phys. 1970. Vol. 53. P. 1094—1097.
134. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во стандартов. 1969.
135. Вукалович М. П., Зубарев В. Н., Александров А. А. Экспериментальное определение удельных объемов водяного пара при температурах 400 — 650° C и давлениях до 1200 кг/см² // Теплоэнергетика. 1961. № 10. С. 30—35.
136. Вукалович М. П., Зубарев В. Н., Александров А. А. Экспериментальное определение удельных объемов водяного пара при температурах 700 — 900° C и давлениях до 1200 кг/см² // Теплоэнергетика. 1962. № 1. С. 49—51.
137. Latto B. Viscosity of steam at atmospheric pressure // Int. J. Heat Mass. Transfer. 1965. Vol. 8. P. 689—720.
138. Шифрин А. С. Вязкость водяного пара при атмосферном давлении // Теплоэнергетика. 1959. № 9. С. 22—27.
139. Tanaka K., Sasaki S., Hattori H. Study of measurements of viscosity of steam at high temperatures // JSME. 1965. Vol. 31. P. 1847—1851.
140. Nagashima A., Tanishita J., Yamaguchi J. Viscosity measurement of water and steam at high temperatures and high pressures // Bull. JSME. 1969. Vol. 12. P. 1467—1472.
141. Nagashima A., Tanishita J., Murai J. Measurement of pressure effect on viscosity of steam // J. Chem. Eng. Data. 1974. Vol. 19, No 3. P. 212—213.
142. Measurement of the viscosity of steam at various temperatures and pressures / T. Sato, T. Minamiyama, J. Yato, T. Oka. // Annal. Meeting JSME, 1970. Vol. 13, № 15. P. 7—9.
143. Варгафтик Н. Б., Олещук О. Н. Зависимость теплопроводности газов от температуры // Известия ВТИ. 1946. № 6. С. 7—15.
144. Варгафтик Н. Б., Зимина Н. Х. Теплопроводность водяного пара при высоких температурах // Теплоэнергетика. 1964. № 12. С. 84—86.
145. Варгафтик Н. Б., Ваничева Н. А., Якуш Л. В. Теплопроводность D_2O в газовой фазе // Инженерно-физический журнал. 1973. Т. 25. № 3. С. 336—340.
146. Brain T. J. S. The thermal conductivity of steam at atmospheric pressure. Techn. Rep. May 1968. No 26. P. 27. Univ. of Glasgow (Proc. of 7th JCPS. 1968. Tokyo. C—15).
147. Bury P. Etude experimentale de la conductivite thermique de la vapeur d'eau jusqu'à 500° C et 500 bar. Paris, 1971.
148. Экспериментальное исследование теплопроводности водяного пара до 800° C и 1000 бар / Н. В. Цедерберг, В. Н. Попов, М. П. Тюрин, В. В. Царев // Тр. МЭИ. 1976. Вып. 313. С. 15—21.
149. Варгафтик Н. Б., Тарзиманов А. А. Экспериментальное исследование теплопроводности водяного пара при высоких параметрах // Теплоэнергетика. 1959. № 9. С. 15—21.
150. Haar L., Gallagher J. S., Kell G. S. NBS/NRS steam tables thermodynamic and transport properties and computer programs for vapor and liquid states of water in SI units. New York: Hemisphere Publ. Corp., 1984.
151. Уравнение состояния воды для области температур 273 — 1123 K и давлений 100 — 200 МПа / В. Н. Зубарев, В. В. Барковский, П. Г. Прусаков, Л. В. Сергеева // Теплоэнергетика. 1984. № 9. С. 71—74.
152. Вукалович М. П., Алтуний В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Атомиздат, 1965.
153. ГСССД 110—87. Диоксид углерода. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 220 ... 1000 K и давлениях от

состояния разреженного газа до 100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во стандартов, 1987.

154. Clegg H. P., Rowlinson L. S., Sutton L. R. The physical properties of some fluorine compounds and their solutions // Trans. Farad. Soc. 1955. Vol. 51. P. 1327—1333.

155. Елема В. А. Экспериментальное исследование сжимаемости шестифтористой серы // Теплоэнергетика. 1970. № 2. С. 70—71.

156. Mears W. H., Rosental E., Sinka L. W. Physical properties and virial coefficients of SF_6 // J. Phys. Chem. 1969. Vol. 73. P. 2254—2261.

157. Жердев Е. П., Улыбин С. А. Термические свойства шестифтористой серы // Теплофизические свойства газов. М.: Наука. 1973. С. 99—104.

158. Ellis C. P., Raw C. J. High temperature gas viscosities. II. Nitrogen, nitric oxide, boron trifluoride, silicon tetrafluoride and sulfur hexafluoride // J. Chem. Phys. 1959. Vol. 30, No 2. P. 574—576.

159. Temperature viscosities and intermolecular forces of quasispherical molecules / R. A. Daw, G. C. Maitland, M. Rigby, E. B. Smith // Trans. Farad. Soc. 1970. Vol. 66. P. 1955—1965.

160. Экспериментальное исследование вязкости шестифтористой серы / Б. А. Григорьев, А. С. Керамиди, В. К. Грачев, Ю. Л. Расторгуев // Теплоэнергетика. 1977. № 9. С. 85—87.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения	5
Введение	6
Раздел первый. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВ	7
1.1. Построение теоретически обоснованного уравнения состояния	7
1.2. Выбор потенциала межмолекулярного взаимодействия. Вириальные коэффициенты	8
1.3. Влияние неаддитивности в старших вириальных коэффициентах	13
1.4. Методика составления согласованных уравнений для расчета равновесных и неравновесных свойств газов	15
1.5. Получение теоретически обоснованных уравнений теплофизических свойств газов путем переаппроксимации полученных ранее уравнений	16
1.6. Расчет таблиц теплофизических свойств газов	20
1.7. Оценка погрешности величин, приведенных в таблицах теплофизических свойств газов	22
Раздел второй. ОДНОАТОМНЫЕ ГАЗЫ	28
2.1. Аргон	28
2.2. Криптон	46
2.3. Ксенон	60
2.4. Неон	71
Раздел третий. ДВУХАТОМНЫЕ ГАЗЫ	89
3.1. Азот	89
3.2. Водород	104
3.3. Кислород	121
3.4. Фтор	135
3.5. Воздух	144
3.6. Оксид азота	159
3.7. Оксид углерода	172
Раздел четвертый. ВОДЯНОЙ ПАР	185
4.1. Уравнение состояния водяного пара	185
4.2. Совместная обработка экспериментальных данных о сжимаемости, вязкости и теплопроводности. Расчет таблиц теплофизических свойств водяного пара	190
4.3. Кривая инверсии водяного пара	198
Раздел пятый. МНОГОАТОМНЫЕ ГАЗЫ	202
5.1. Диоксид углерода	202
5.2. Гексафторид серы	214
Список литературы	223
	231

Справочное издание

Зубарев Владимир Николаевич
Козлов Александр Дмитриевич
Кузнецов Владимир Михайлович
Сергеева Людмила Валентиновна
Спиридонов Гельберт Александрович

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИ
ВАЖНЫХ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
И ДАВЛЕНИЯХ**

Редактор издательства *М. И. Кузнецова*
Художественный редактор *В. А. Гозак-Хозак*
Технический редактор *Т. Ю. Андреева*
Корректор *Л. А. Гладкова*
ИБ № 1508

Сдано в набор 20.02.89. Подписано в печать 22.06.89. Т-11213 Формат
60×88¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,21. Усл. кр.-отт. 14,21. Уч.-изд. л. 21,28. Тираж 8000 экз.
Заказ 1022. Цена 1 р. 40 к.

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
МПО «Первая Образцовая типография» Госкомиздата СССР. 113054
Москва, М-54, Валовая, 28.